

Reinhard Breuer
Chefredakteur

Geheimnisse, die für immer verborgen bleiben

Was macht den Urknall so faszinierend? Dass wir, da sind sich die Kosmologen einig, sein Geheimnis niemals völlig lüften können. Diese Tatsache ist für hart gesottene Empiriker ziemlich misslich; ist doch die Naturwissenschaft angetreten, alles in der Welt zu untersuchen – und aufzuklären.

Aber nicht alles lässt sich auch wissenschaftlich erschöpfend beschreiben – sei es nun bloß de facto nicht oder sogar grundsätzlich nicht. Beispiele gibt es genügend: seien es einmalige Ereignisse wie der Ursprung des Lebens oder die Entstehung des Bewusstseins, seien es psychische oder soziale Prozesse. Ganz abgesehen von Abgrenzungsfragen zwischen Wissenschaft und Religion, bei denen es wohl immer strittige Territorialkonflikte geben wird.

Beim Urknall mag dies besonders frustrierend klingen. Wer wüsste nicht gern, was im kosmischen Nullpunkt geschah, wie Raum und Zeit entstanden? Gab es einen Zustand, sozusagen ein kosmisches Leben vor dem Urknall? Doch was vor dem Urknall war, wird mathematischen Spekulationen vorbehalten bleiben. Schon die Frage danach ist so sinnvoll wie die Frage, was nördlich des Nordpols liegt – da zumindest im Standardmodell die Zeit erst mit dem Urknall begann.

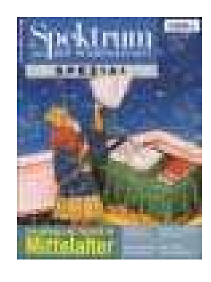
Die ältesten Relikte von der Geburt des Kosmos liefert uns die kosmische Hintergrundstrahlung. Als Zeuge des Moments, in dem das Universum durchsichtig wurde, spiegelt der Strahlungshintergrund den Zustand des Alls knapp eine Million Jahre nach dem Urknall wider. Gleichzeitig verhüllt er aber wie ein Schleier alles, was zuvor geschah.

Die Eigenschaften dieser Urstrahlung werden derzeit von dem Nasa-Satelliten Map (Microwave Anisotropy Probe) mit unübertroffener Präzision vermessen. Wie der Kosmologe Craig J. Hogan in seinem Beitrag ab Seite 28 erläutert, bietet die Map-Himmelsvermessung zumindest die Aussicht, demnächst die Quantenstruktur des kosmischen Beginns zu erahnen. Denn die blitzartige „inflationäre“ Ausdehnung des Kosmos im ersten Sekundenbruchteil vergrößerte die anfänglichen Quantenfluktuationen wie ein gigantisches Mikroskop und fror sie im erkaltenden Kosmos ein. „Das Größte und das Kleinste sind ein und dasselbe“, notiert der Amerikaner aus Seattle.

In der frühesten Ära war der Kosmos durch Quantensprünge in der Struktur von Raum und Zeit geprägt; erst später ging daraus unsere kontinuierliche Raumzeit hervor. Map wird vermutlich erste Spuren dieses Quantenmusters in der Hintergrundstrahlung entdecken können – ein Blick auf den Ursprung der Zeit.

Doch auch eine Enttäuschung hält Hogan parat. Die Signale des Quantenurknalls werden gewiss nicht sämtliche Rätsel der Schöpfung lösen: Der Anfang der Zeit wird „wesentlich weniger interessant“ sein „als alles, was später geschah“.

Die Geschichte des Universums enthält also unermesslich viel mehr als die Ausführung eines Programms, das mit dem Urknall bereits feststand.



Unser neues Sonderheft „Forschung und Technik im Mittelalter“ ist erschienen. Die Alchemisten, Astronomen, Heilkundler und Techniker jener Tage waren oft aufgeklärter, als es die „dunklen Jahrhunderte“ vermuten lassen.

FORSCHUNG AKTUELL

SPEKTROGRAMM

THEMEN

TITELBILD:

Auf dem Höhepunkt ihrer Macht errichteten die Maya prachtvolle Bauten mit reich verzierten Fassaden – die abgebildete „Königin von Uxmal“ schmückt eine Tempelpyramide. Doch aus noch ungeklärten Gründen fielen die Städte im Tiefland von Yukatan um 900 n. Chr. wüst und leer.

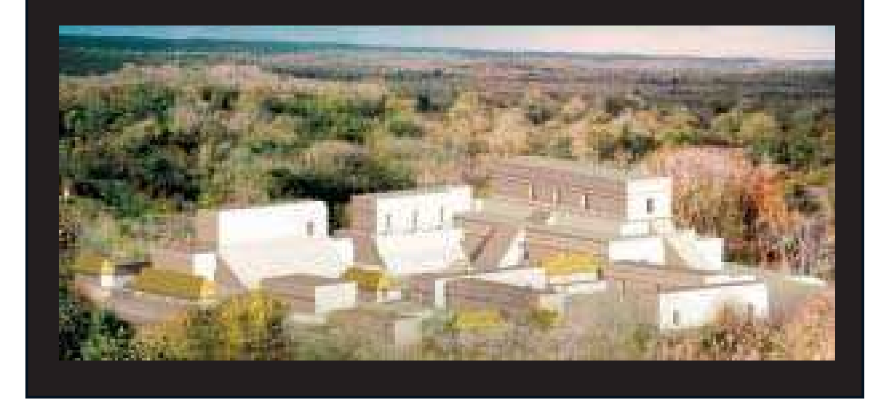
Michel Zabé/Banco Mexicano de Imagenes/Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), Mexico

TITELTHEMA: MAYA-ARCHÄOLOGIE

Der Untergang von Xkipché

Seite 38

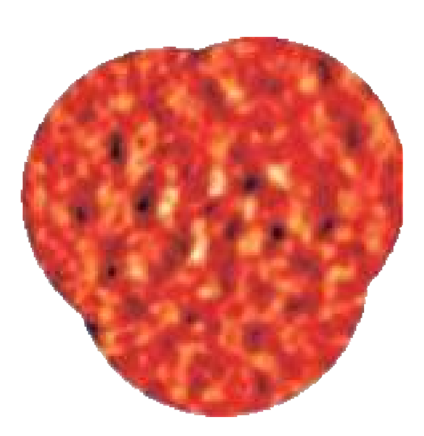
Abrupt endete die Hochkultur der Maya im Tiefland Yukatans. Krieg oder Klimawandel? Noch heute rätseln Archäologen, warum blühende Städte plötzlich verfielen.



URKNALL Seite 28

Auf der Suche nach dem Quanten-Ursprung der Zeit

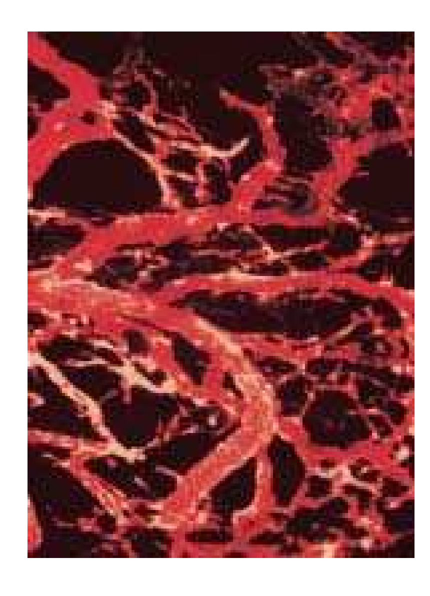
Die kosmische Hintergrundstrahlung, ein schwaches Nachleuchten des Urknalls, erfüllt den Weltraum nicht völlig gleichförmig. Genaue Messungen dieser Unregelmäßigkeiten könnten einen Hinweis auf den Quanten-Ursprung von Raum und Zeit geben.



MEDIZIN Seite 46

Krebs aushungern – die große Herausforderung

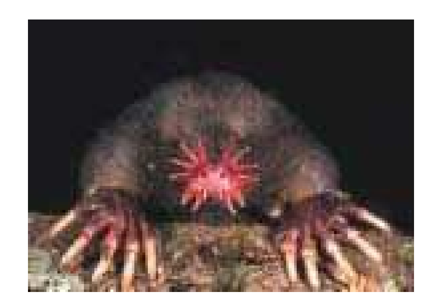
Forscher wollen das Aussprossen neuer Blutgefäße gezielt beeinflussen, um vielfältige Krankheiten von Krebs bis Herzinfarkt zu therapieren. Etliche potenzielle Medikamente werden inzwischen am Menschen erprobt. Was im Tierexperiment teilweise hervorragend funktioniert, lässt sich allerdings nicht so leicht in die medizinische Praxis umsetzen.



GEHIRNFORSCHUNG Seite 54

Die schnellste Nase der Welt

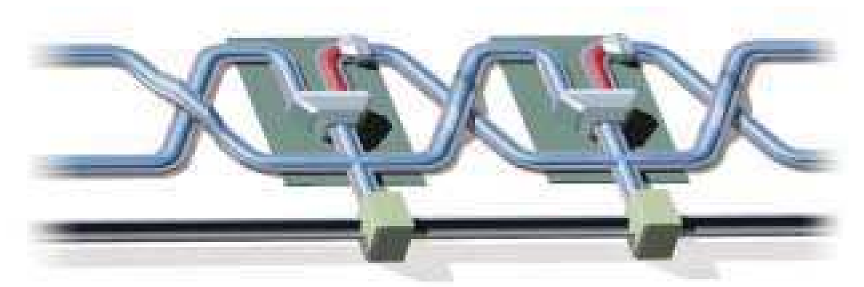
Der Sternmull sieht aus, als käme er von einem anderen Stern. Der Fingerkranz an der Nasenspitze dieses amerikanischen Maulwurfs ertastet Beutetiere mit rasend schnellen Bewegungen.



COMPUTERTECHNIK Seite 60

Taktlose Computer

Befreit vom Diktat einer zentralen Uhr, erbringen so genannte asynchrone Chips höhere Leistungen: Sie lassen jeden ihrer Schaltkreise laufen, so schnell er kann.



BIOLOGISCHE WAFFEN Seite 72

Hightech gegen Bioterror

Biologen und Ingenieure entwickeln Frühwarnsysteme, die bereits kleine Mengen von Erregern und Giftstoffen aufspüren. Damit hoffen sie, die Folgen von Terroranschlägen mit biologischen Waffen mildern zu können.



TECHNOSKOP-MAGAZIN Seite 82

Stopp! Fußgänger!



Neuronale Netzwerke im Auto identifizieren querende Passanten in Sekundenbruchteilen.

Außerdem:

➤ Lebensmittelindustrie: Wie fit sind die Mikroben im Käse?
➤ Crash-Test: Knautschzonen für die Deutsche Bahn

TECHNOGRAMM

➤ Zähneklappern im Computer
➤ Stete Mikrowelle höhlt den Stein
➤ Strippenziehen

FORSCHUNG UND GESELLSCHAFT

REZENSIONEN

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

WEITERE RUBRIKEN

Ihr Wissenschafts-Portal: www.wissenschaft-online.de



Täglich Meldungen aus Wissenschaft, Forschung und Technik. Dazu Hintergrundinformationen, Software, Preisrätsel und Spektrum-Produkte. Ihr Spektrum-Magazin finden Sie wie immer unter **www.spektrum.de**

Inselbegabungen – September 2002

Kim Peek ist ein Phänomen, das „7600 Bücher auswendig kennt“. Hat er diese Begabung seinem linksseitigen Hirnschaden zu verdanken, während Gedächtniskünstler mit intakten Gehirnen zwar erstaunliche, aber vergleichsweise bescheidene Gedächtnisleistungen vollbringen? Vielleicht ja; denn Kim Peek lernt, ohne zu begreifen! Für ihn sind die Worte der Bücher sinnleer wie bei einem sprechenden Papagei. Sowohl dem Tier als auch (zumindest teilweise) Kim Peek fehlt die Möglichkeit, Worten Bedeutungen zuzuweisen. Verantwortlich dafür können z. B. Schäden im so genannten „sensorischen Sprachzentrum“ der linken Großhirnhälfte sein. Allerdings brauchen wir Menschen nicht nur Wortbedeutungen, sondern auch bedeutungsvolle Gedanken und -folgen. Was aber reiht Worte und einfache Gedanken zu komplexen Gedankenfolgen aneinander? Wir wissen es nicht, weil dieser Reihungsprozess in unbewussten Hirnbereichen stattfindet. Ein möglicher Kandidat dafür wäre das Kleinhirn, welches auch die Feinsteuerung unserer Bewegungen bewirkt.

Sollte es (oder auch ein anderer Kandidat) unsere komplexen Gedankenfolgen steuern, so bliebe in einem geschädigten Gehirn, das solcher Folgen nicht fähig ist, viel Platz frei, um auch bedeutungslose Wortfolgen zu speichern.

Prof. Peter R. Gerke, Gräfelfing



Kim Peek kennt 7600 Bücher auswendig und beherrscht alle Vorwahlnummern, Highways, Postleitzahlen und Fernsehsender der USA.

ETHAN HILL

Auf leisen Flügeln
Wissenschaft in Unternehmen, August 2002

In der Erklärung für Dezibel muss es richtig heißen: Per Definition ist der Hörschwelle eines 1000-Hz-Tones der Wert 0 dB zugeordnet.

Die subjektive Empfindung „Lautstärke“ kann mit dem Schallpegelmaß allein nicht beschrieben werden. So ist ein tieffrequenter Schall um 50 Hz beispielsweise erst bei einem Pegel von 40 dB hörbar, ein Ton von 4000 Hz aber bereits bei minus 2 dB. Man kann das Thema nicht behandeln, ohne die Einheiten „Phon“ (Lautstärke), „Sone“ (Lautheit) und db(A) (mit der Filterkurve ‚A‘ bewerteter Schallpegel) einzuführen.

Dr. Wolfgang Pieper, Gießen

Die Lomborg-Kontroverse
August 2002

Interessant ist, dass ein relativ junger und unbekannter Professor aus Dänemark, Politologe und Statistiker zudem, die etablierte Ökologiegemeinde mit einem Buch aufschreckt, dessen (richtige oder falsche) Ergebnisse und Thesen so gar nicht in das publizierte Weltbild dieser ökologischen Gemeinde passen. Den vier bei Ihnen zu Wort kommenden ‚Experten‘ widmen Sie immerhin neun Seiten, dem Autor selbst keine, und sein Buch ist tituliert als ein ‚Anti-Öko-Pamphlet‘. Es stände wenigstens der deutschen Ausgabe von Scientific American gut zu Gesicht, nicht einseitig Partei zu beziehen, sondern auch dem Autor Gelegenheit zur Antwort zu geben. Der Verweis auf die Webseiten reicht hierzu nicht. Erstaunlich ist, dass Lomborg auf die üblichen Worthülsen der etablierten Wissenschaft mit belegten Fakten antwortet. Hat er da vielleicht doch in ein Wespennest gestochen? Trotzdem Dank für die Publikmachung dieser aktuellen Kontroverse.

Dr. M. Böhm, Mannheim

Ist Deutsch als Wissenschaftssprache „out“?
Leibniz-Journal, Juli 2002

Ein zentraler Punkt ist hier nicht berücksichtigt worden, und zwar der nötige Anlass zur Kommunikation. Sie ist ja kein Selbstzweck. Jeder Teil der Gesellschaft, egal ob es sich um Wissenschaftler, Politiker, Bäcker oder Hufschmied handelt, hat seine eigene Sprache.

Die Frage nach der Kommunikation stellt sich aber da, wo der eine vom andern etwas will. Und da galoppieren Forschung und Gesellschaft munter nebeneinander her. Es liegt nicht an der Sprache, sondern am fehlenden Sprechanlass mangels Berührung. Als ich Mitte der 1990er Jahre hörte, es gäbe im Umweltministerium von NRW derzeit keinen wirklichen Naturwissenschaftler, empfand ich das als eigentlich unglaublich. Dies soll kein Rundumschlag nach dem Motto „böse Politik, böse Politiker“ werden, sondern etwas verdeutlichen. Ein Ministerium ist eine Schnittstelle, die beim und für den Bürger feststellen soll, wo etwas im Argen liegt, und die kompetente Fachleute zur Lösung der Probleme heranzieht. Dazu sollte es die Sprache beider beherrschen und sie möglichst miteinander ins Gespräch bringen.

Was wir also dringend brauchen, sind funktionierende Schnittstellen, die Leben in die Beziehung des Bürgers zur Wissenschaft und umgekehrt bringen. Erst wenn beide Seiten die Sprache des andern sprechen, entsteht ein sinnvoller Dialog, und damit rückt auch der eigentliche Zweck von Wissenschaft wieder enger ins Blickfeld: uns allen Nutzen zu bringen.

Christoph Jansen, Bad Zwischenahn

Eisige Bohrung in Tibets Klima-Archiv – Forschung aktuell, September 2002

Neben der Beschreibung der Vorgehensweise und Ergebnisse wird auch über die ansässige Bevölkerung dort berichtet. Dabei ist den Autoren allerdings ein Fehler unterlaufen: Bei den Uiguren handelt es sich keinesfalls um ein arabischstämmiges Volk. Es stimmt, dass die meisten Uiguren Muslime sind, aber deshalb stammen sie noch lange nicht von Arabern ab. Richtig ist, dass dieses Volk aus einer Mischung des Turkvolkes der Uighuren (mit „h“) mit iranischen und mongolischen Elementen entstanden ist. Die Uighuren (mit „h“) eroberten übrigens im Mittelalter das damalige türkische Ostreich (Ostturkestan) bis hin zur Mongolei.

Zu den heutigen Uiguren zählt man auch die Tarantschen, die Jerlik, die Kaschgharlik und die Jetischerlik, zusammen heute etwa vier bis fünf Millionen Menschen, die in verschiedenen Staatsgebilden ansässig sind.

Hans G. Kleefisch, Erdesbach

Großlabor mit Plumpsklo – Forschung und Gesellschaft, Juli 2002

Eine Zusammenarbeit zwischen Desy und Geo 600 würde beiden Vorteile bringen: Der 30-km-Tunnel von Tesla würde den Gravitationswellen geradezu ein Genuss sein und einen zusätzlichen Nutzer für Desy bringen. Die etwas komfortableren sanitären Einrichtungen bei Desy würden den Geo-600-Mitarbeitern und -innen auch gefallen.

Franz Fick, Hamburg

Ursprache der Alteuropäer

Leserbriefe, Oktober 2002

Ich bin zwar Jäger, antworte aber aus Sicht eines an Sprachgeschichte Interessierten. Der Keiler ist das männliche Wildschwein ab dem 3. Lebensjahr. Die Bezeichnung Keiler oder Keuler kam in den schriftlichen Quellen erst im 17. Jahrhundert auf, nachzulesen in Grimms Deutschem Wörterbuch. In alter Zeit war das männliche Schwein der Eber, wobei man in erster Linie das männliche Wildschwein meinte. Regional hatte man nämlich für das Hausschwein auch die Bezeichnungen „behr, bär, beier", im Englischen heute boar. Im Wesentlichen definierte man aber über die Adjektive zahm und wild. Im Übrigen halte ich die in dem Aufsatz dargestellte These einer dem Baskischen verwandten Ursprache bei aller Diskussionswürdigkeit der einen oder anderen Annahme durchaus nicht für eine „wilde Theorie".

Dr. Manfred Förster, Obernkirchen

Briefe an die Redaktion ...

... richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: (0 62 21) 91 26-729

Älteste Dame Europas?

Spektrogramm, Oktober 2002

Mit größter Sicherheit handelt es sich bei dem rechts abgebildeten dekorativen Stück Elfenbein keineswegs um eine Schachfigur.

Bereits im Juni dieses Jahres erschien im Mitteilungsblatt „The Chess Collector", Vol. XI, No. 2, der Sammler-Vereinigung Chess Collectors International eine kritische Stellungnahme von Experten aus diesem Kreise zur ersten Interpretation des in Albanien gefundenen Objekts.

Ich habe den Problemfall der Verbreitung der ursprünglichen Information mit Herrn Dr. Irving L. Finkel, Keeper of the Department of Western Asiatic Antiquities, beim British Museum in London diskutieren können. Dieser war schon sehr früh zu der besagten „Entdeckung" befragt worden. Noch ehe er eine Stellungnahme gegenüber den Forschern um Richard Hodges von der University of East Anglia in Nor-wich abgeben konnte, hatte die Presseagentur Reuter eine irrige Vermutung zur Tatsache gemacht und die Fehlmeldung in die Welt gesetzt.

STEVE DIEHL

Förderkreis Schach-Geschichtsforschung e.V., Manfred Eder, Kelkheim

Herzinfarkt – Juli 2002

Der Untertitel „Neue Resultate enthüllen die wahren Ursachen" auf der Titelseite erscheint mir wegen diverser Unklarheiten im Text etwas reißerisch.

Aber ihr Aufsatz ist ein wichtiger Lichtblick, zeigt er doch deutlich, wie wenig die koronaren Gefäßerkrankungen verstanden sind.

Es bleibt aber der Eindruck, an der Cholesterin-These um jeden Preis festhalten zu wollen. Dabei könnte man – böswillig? – aus den präsentierten Daten auch genauso gut schließen, ausschlaggebend für das Infarktrisiko sei nicht die LDL-Menge, sondern allein die individuenspezifische Reaktion der Gefäßwand auf eingelagertes LDL.

Sicher, das ist alles nicht belegt. Aber lediglich genauso wenig sicher wie alle anderen „wahren Ursachen"!

Martin Füßlein, Düsseldorf

Errata

Schnipsel-Jagd – Technoskop, Oktober 2002

Im Beitrag steht, dass Mukoviszidose-Patienten an einer quälenden Verschleimung der Lungen infolge einer Störung der Atmung leiden. Richtig ist es umgekehrt: Die Atmung ist erschwert infolge eines zähen (mukösen) Schleimes in den Lungen und den dadurch leicht entstehenden Folgeerkrankungen.

Die Redaktion

Data Mining mit bloßem Auge – November 2002

Von der von mir erstellten Grafik in „Das Netz des Terrors" (S. 89) ist eine veraltete Version abgedruckt. So ist der dort aufgeführte Lotfi Raissi inzwischen von einem britischen Gericht aus Mangel an Beweisen freigelassen worden. Eine aktuelle Version der Grafik samt Zusatzinformationen ist unter http://www.orgnet.com/hijackers.html zu finden.

Valdis Krebs (valdis@orgnet.com)

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle, Christina Peiberg
Bildredaktion: Alice Krüßmann
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Natalie Schäfer, Andreas Merkert (stv. Hersteller)
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, 69038 Heidelberg Tel. (0 62 21) 91 26-711, Fax (0 62 21) 91 26-729
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (0 22 44) 43 03, Fax (0 22 44) 63 83, E-Mail: ghalt@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (02 11) 908 3357, Fax (02 11) 908 33 58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Produktentwicklung: Dr. Carsten Könneker, Tel. (0 62 21) 91 26-770
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. (0 62 21) 91 26-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. (0 62 21) 91 26-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. (0 62 21) 91 26-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Bernhard Epping, Dr. Werner Gans, PD Dr. Udo Gansloßer, Dr. Stefan Hartung, Stephen Koszudowski, Dr. Susanne Pätzold.

Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. (0 62 21) 91 26-600, Fax (0 62 21) 91 26-751
Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossle
Leser-Service: Tel. (0 62 21) 91 26-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft, Boschstraße 12, 69469 Weinheim, Tel. (0 62 01) 60 61 50, Fax (0 62 01) 60 61 94
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Sibylle Roth, Tel. (02 11) 887-23 79, Fax (02 11) 887-23 99 verantwortlich für Anzeigen: Stefan Söht, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 887-23 86, Fax (02 11) 887-28 46
Anzeigenvertretung: Berlin-West: Rainer W. Stengel, Lebuser Str. 13, 10243 Berlin, Tel. (0 30) 7 74 45 16, Fax (0 30) 7 74 66 75; Berlin-Ost: Dirk Schaeffer, Friedrichstraße 150–152, 10117 Berlin, Tel. (030) 6 16 86-150, Fax (0 30) 6 15 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Stefan Irmler, Burchardstraße 17, 20095 Hamburg, Tel. (0 40) 30 18 31 94, Fax (0 40) 33 90 90; Düsseldorf: Cornelia Koch, Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 3 01 35-20 50, Fax (02 11) 1 33 97 4; Frankfurt: Anette Kullmann, Annelore Hehemann, Holger Schlitter, Große Eschenheimer Straße 16–18, 60313 Frankfurt am Main, Tel. (0 69) 92 01 92 82, Fax (0 69) 92 01 92 88; Stuttgart: Norbert Niederhof, Königstraße 20, 70173 Stuttgart, Tel. (0711) 22 475 40, Fax (07 11) 22 475 49; München: Reinold Kassel, Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15, 80331 München, Tel. (0 89) 54 59 07-12, Fax (0 89) 54 59 07-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. (02 11) 8 87-23 87, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 23 ab 01.01.2002.

Gesamtherstellung: VOD – Vereinigte Offsetdruckereien GmbH, D-69214 Eppelheim

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg

NOBELPREIS FÜR MEDIZIN

Ein fader Wurm im Fadenkreuz der Freitod-Forscher

Genau 131 gehen freiwillig in den Tod, damit 959 überleben können – so sieht die Bilanz bei den Zellen von *Caenorhabditis elegans* aus. Für die Aufklärung des programmierten Zelltodes bei diesem Fadenwurm gab es nun den Medizin-Nobelpreis.

Von Andreas Jahn

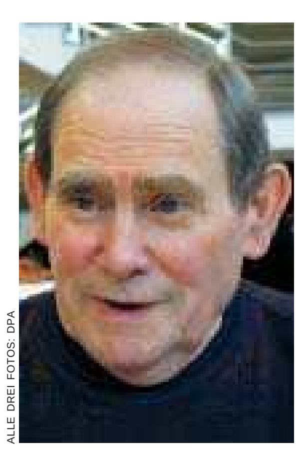
Er ist winzig klein – knapp einen Millimeter lang – und hat schon eine erstaunliche Karriere hinter sich: Der Nematode *Caenorhabditis elegans* gilt unter Entwicklungsbiologen als eine der am besten untersuchten Tierarten.

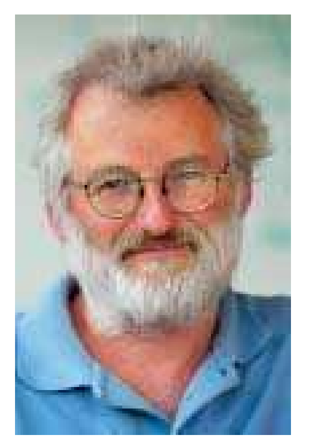
Sein Siegeszug durch die Labors begann in den 1960er Jahren, als Sydney Brenner an der Universität Cambridge nach einem Organismus suchte, bei dem sich das Schicksal jeder einzelnen Zelle im Laufe der Embryonalentwicklung verfolgen lässt. Damals wussten die Biologen bereits, dass der wachsende Keim über einen Anlagenplan verfügt, der festlegt, zu welchen Organen sich seine einzelnen Bereiche entwickeln. Außerdem war klar, dass bestimmte Zellen freiwillig in den Tod gehen, wenn ein höheres Lebewesen Gestalt annimmt; das hatte der deutsche Naturforscher und Politiker Carl Vogt (1817–1895) schon 1842 am Nervensystem von Embryonen der Geburtshelferkröte beschrieben. Auch beim menschlichen Fötus sterben beispielsweise die Zellen der ursprünglich vorhandenen „Schwimmhäute“ zwischen den Fingern und Zehen ab. Der zelluläre Selbstmord – wissenschaftlich als programmierter Zelltod oder Apoptose bezeichnet – gehört damit unabdingbar zum Leben.

Brenner, 1927 in Südafrika geboren, hatte 1954 an der Universität Oxford promoviert und sich danach in Cambridge als Bürogenosse von Francis C. H. Crick, einem der Entdecker der DNA-Struktur, Verdienste um die Aufklärung des genetischen Codes erworben. Während die Molekularbiologen später erste Einblicke in die genetische Steuerung der Lebensvorgänge bei Bakterien gewannen, war es Brenners Ziel, auch das Zusammenspiel der Gene bei höheren Organismen zu verstehen. Zwar ließ sich durch Anfärbeexperimente die Embryonalentwicklung bei Wirbeltieren schon in groben Zügen verfolgen. Doch schien es so gut wie aussichtslos, herausfinden zu wollen, warum welche Zelle sich zu welchem Zeitpunkt weiter teilt – oder zu Grunde geht. Dafür ist die Anzahl der Zellen, aus denen schon ein früher Wirbeltier-Embryo besteht, einfach zu groß.

Dass *C. elegans* einen eleganten Ausweg aus diesem Dilemma bietet, war eine der genialen Einsichten Brenners. Bevor er das Würmchen als „Haustier“ der Entwicklungsbiologen etablierte, interessierte sich kaum jemand für den primitiven Organismus, der im Gegensatz zu vielen parasitischen Nematodenarten frei lebend im Boden vorkommt. Doch für das Studium der Embryonalentwicklung bietet er ideale Voraussetzungen. So besteht er aus nur wenigen Zellen und ist durchsichtig, sodass sich Zellteilungen direkt unter dem Mikroskop beobachten lassen. Außerdem hat er eine kurze Generationszeit: Schon nach zwei Tagen ist er geschlechtsreif und erzeugt unter günstigen Bedingungen innerhalb einer Woche knapp eine Million Nachkommen.

In bahnbrechenden Untersuchungen mit *C. elegans* konnte Brenner mit Ethylmethansulfonat Mutationen in verschiedenen Genen auslösen und die Auswirkungen auf die Organentwicklung und das Verhalten ermitteln. Mit diesen Arbeiten, deren Ergebnisse er 1974 publizierte, wies er nach, dass wichtige Schritte in der Embryonalentwicklung des Fadenwurms genetisch gesteuert werden.





ALLE DREI FOTOS: DPA

Sydney Brenner (links) vom Salk-Institut in La Jolla, John E. Sulston (Mitte) vom Sanger Centre in Cambridge (England) und E. Robert Horvitz vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge wurden gemeinsam für ihre Entdeckungen zur genetischen Steuerung der Organentwicklung und des programmierten Zelltods mit dem Medizin-Nobelpreis geehrt.

Vom Wurm zum Menschen

Auf Brenners Experimenten baute John E. Sulston auf, der seit 1969 ebenfalls in Cambridge forschte. Dem 1942 geborenen Engländer, der heute das Sanger-Institut der Firma Wellcome leitet, gelang es 1976, den genauen Ursprung der Zellen in einem Teil des Nervensystems von *C. elegans* aufzuklären. Bis 1983 konnte er diesen Stammbaum dann auf den gesamten Wurm ausdehnen. Demnach entstehen aus der befruchteten Eizelle exakt 1090 Körperzellen. Doch 131 davon sterben während der Embryonalentwicklung, sodass der ausgewachsene Wurm nur aus 959 Körperzellen besteht. Sulston entdeckte auch das erste Gen, das an diesem Zelltod beteiligt ist; *nuc-1* genannt, enthält es den Bauplan für ein Enzym, das für den Abbau der Erbsubstanz in den todgeweihten Zellen benötigt wird.

Tiefere Einblicke in den Mechanismus der Apoptose, bei der sich der Zellkern auflöst und die Zelle in mehrere membranumhüllte Bläschen zerfällt, konnte in den 1970er und 1980er Jahren schließlich E. Robert Horvitz vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge gewinnen. Der 1947 geborene Amerikaner, der nach seiner Promotion im Jahre 1974 seine Untersuchungen am Fadenwurm in Cambridge begann, identifizierte zwei Gene, *ced-3* und *ced-4* (*ced* steht für *cell death*), ohne die der programmierte Selbstmord nicht stattfinden kann. Kontrolliert werden sie, wie Horvitz später herausfand, von einem weiteren Gen namens *ced-9*. Dessen Pro-

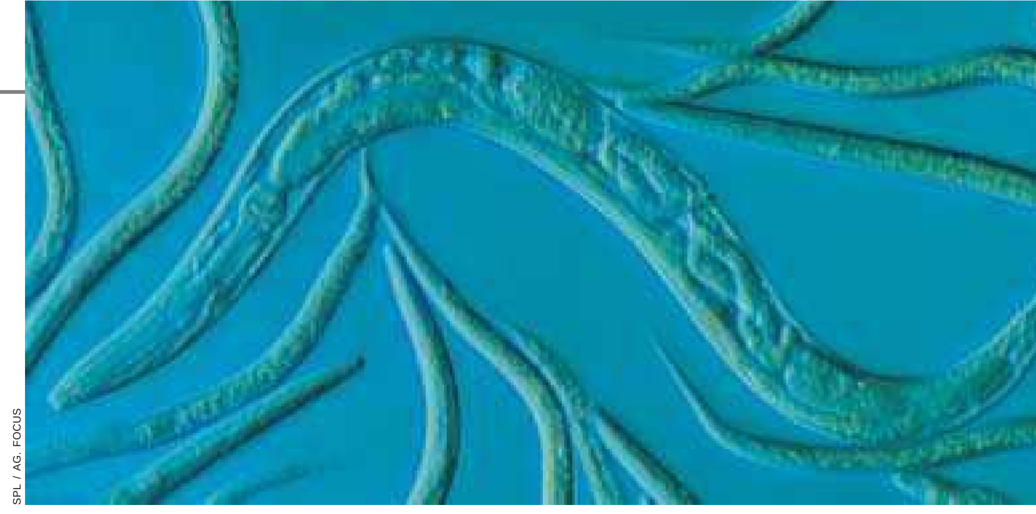
teinprodukt unterdrückt das Ablesen der Todesgene. Jede Zelle ist also gleichsam natürlicherweise auf Selbstmord programmiert und muss aktiv daran gehindert werden. Unterbleibt das Signal zum Weiterleben, weil *ced-9* inaktiviert wird, können *ced-3* und *ced-4* in Aktion treten und ihr tödliches Programm starten.

Sind die Ergebnisse der Forschungen am Fadenwurm für sich allein schon interessant, so verleihen ihnen die Parallelen zum Menschen erst ihre enorme Bedeutung. Denn die Selbstmordgene erwiesen sich als uralte evolutionäre Erbstücke, die auch bei *Homo sapiens* ihr Werk vollbringen. So entspricht *ced-4*, wie Horvitz herausfand, dem menschlichen *Apaf-1*-Gen, das ebenfalls an der Apoptose beteiligt ist. Inzwischen hat sich gezeigt, dass die meisten Gene, die den programmierten Zelltod bei *C. elegans* steuern, Pendants beim Menschen haben.

Überhaupt lässt sich vom winzigen Fadenwurm erstaunlich viel über uns Menschen lernen, die wir aus rund 25 Milliarden Mal so vielen Zellen bestehen. Allerdings erscheint der Unterschied bereits sehr viel weniger eklatant, wenn man das Erbgut betrachtet. Der Mensch hat nur etwa 30-mal so viel DNA wie der winzige Wurm und sogar nur knapp doppelt so viele Gene (geschätzte 35 000 gegenüber rund 19 000). Und von 50 bis 70 Prozent der Wurm-Gene gibt es Gegenstücke in unserem Körper.

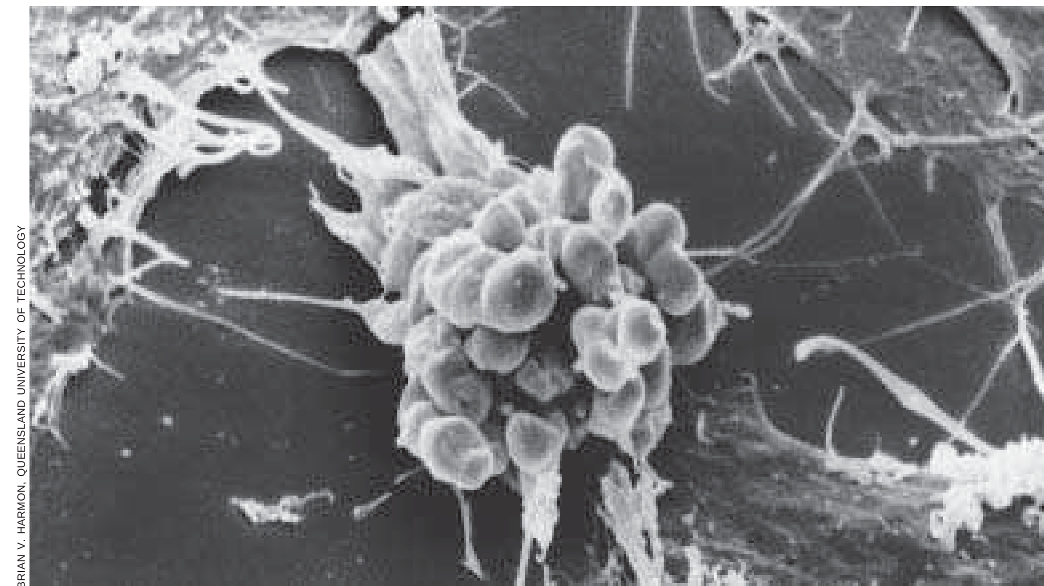
Heute ist die Apoptose, deren Hintergründe die drei Preisträger an *C. elegans* aufzuklären begannen, zu einem der bedeutendsten und spannendsten Gebiete der Zellbiologie geworden. An die 2000 Wissenschaftler weltweit befassen sich damit und haben 1999 beispielsweise 8045 Arbeiten darüber veröffentlicht – mehr als im selben Zeitraum über das Aids-Virus erschienen sind. Der Grund liegt in der enormen Bedeutung, die eine Störung des zellulären Selbstmordprogramms für den menschlichen Organismus besitzt. Viele schwere Krankheiten haben hier ihre Ursache. So werden bei neurodegenerativen Erkrankungen wie der multiplen Sklerose gesunde Zellen fälschlich in den Selbstmord getrieben. Auch beim Schlaganfall oder Herzinfarkt gehen viele Zellen in der Umgebung des primär geschädigten Bereichs unnötig in den Tod, weil fälschlich ihr Apoptose-Programm eingeleitet wird. Erst dadurch kommt es zu dem massiven Untergang von Gewebe, der dauerhafte Schäden oder sogar den Tod verursachen kann.

Genauso verheerend sind umgekehrt die Folgen, wenn das Selbstmordprogramm außer Kraft gesetzt wird. Unterbleibt der eigentlich nötige Opfergang, lautet die Diagnose oft Krebs. Alle Körperzellen überwachen sich nämlich unablässig selbst und werden zusätzlich vom Immunsystem daraufhin kontrolliert, ob sie noch intakt sind und normal funktionieren. Wenn nicht, leiten sie eigenhändig den programmierten Freitod ein oder erhalten von Abwehrzellen das Signal dafür. Entartete Zellen werden auf diese Weise frühzeitig aus dem Verkehr gezogen. Bei Krebs ist diese Sicherung jedoch meist ausgeschaltet. So kann der Tumor ungestört wuchern, obwohl sein Gewebe sich von seiner ursprünglichen Bestimmung im Organismus losgesagt hat.



SPL / AG. FOCUS

Der kleine, durchsichtige und leicht zu züchtende Fadenwurm eignet sich, wie Sydney Brenner erkannte, ideal für Untersuchungen der Embryonalentwicklung.



BRIAN V. HARMON, QUEENSLAND UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Bei der Apoptose zerfällt die todgeweihte Zelle in mehrere membranumhüllte Bläschen, die von Nachbarzellen aufgenommen werden.

Angesichts der Bedeutung der Apoptose-Forschung kam die Ehrung für ihre drei Pioniere auch nicht überraschend. Vor allem Brenner stand schon lange auf der Kandidatenliste für den Nobelpreis. Er dürfte auch die schillerndste Figur unter den drei Laureaten sein. Nach seiner Emeritierung im Jahre 1992 dachte er keineswegs an Ruhestand, sondern gründete mit dem Institut für Molekulare Wissenschaften in Berkeley (Kalifornien) ein eigenes Unternehmen, das er bis 1997 leitete. Seither arbeitet er als Professor am Salk-Institut in La Jolla. Auch sein Lieblingsforschungstier hat er im hohen Alter noch einmal gewechselt: Er interessiert sich nun für den giftigen japanischen Pufferfisch Fugu, bekannt als kulinarische Delikatesse, der das kleinste Genom aller Wirbeltiere hat.

Pikanterweise hat Brenner sich recht kritisch über das menschliche Genom-Projekt und dessen Ergebnisse geäußert. Das dürfte seinen Mitpreisträger Sulston wenig freuen; denn der war in den letzten zehn Jahren als treibende Kraft an der Erstellung der Erbgutkarte des Menschen entscheidend beteiligt. ■

Andreas Jahn *ist promovierter Biologe und Redakteur bei wissenschaft-online. Dort steht unter www.wissenschaft-online.de/nobelpreise ein Nobelpreis-Special.*

NOBELPREIS FÜR PHYSIK

Neue Fenster für den Blick ins All

Jahrtausendelang beobachteten die Menschen die Gestirne nur mit den Augen. Der Nobelpreis für Physik ging an Forscher, die halfen, den Kosmos in einem anderen Licht zu sehen – mit der Röntgenbrille oder im Spiegel geisterhafter Neutrinos.

Von Thorsten Krome

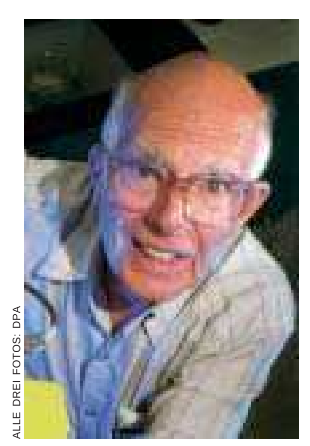
Es muss Galileo Galilei buchstäblich die Augen geöffnet haben, als er zum ersten Mal sein selbst gebautes Fernrohr auf den Mond und den Planeten Jupiter richtete. Erst dieses technische Hilfsmittel, das er Anfang des 17. Jahrhunderts nach niederländischem Vorbild baute, verhalf ihm zu den bedeutenden astronomischen Entdeckungen, die ihn berühmt machten.

Heute, rund 400 Jahre nach Galilei, reichen optische Hilfsmittel allein nicht mehr aus, um dem Weltraum seine Geheimnisse zu entlocken. Denn das sichtbare Licht umfasst nur einen kleinen Teil des elektromagnetischen Spektrums. Ein anderer Teil besteht beispielsweise aus jener kurzwelligen, energiereichen Strahlung, für deren Entdeckung Wilhelm Conrad Röntgen 1901 den ersten Physik-Nobelpreis erhielt. Abgesehen davon, dass sie für uns unsichtbar ist, wird ihr Nachweis im Kosmos auch durch die Erdatmosphäre erschwert, die sie praktisch vollständig absorbiert. Aber nicht nur manche Strahlungsart entzieht sich der direkten Beobachtung, auch bestimmte Teilchen, die in stetem Strom aus dem Weltall auf uns niederprasseln, passieren die Erde, ohne dass wir etwas davon mitbekommen.

Das gilt etwa für das Neutrino: ein neutrales Teilchen verschwindend kleiner Masse, dessen Existenz Wolfgang Pauli (Nobelpreis 1935) schon 1930 vorhersagte. Doch es dauerte 25 Jahre bis zum experimentellen Nachweis. Dabei ist das Neutrino alles andere als selten. Wie die Physiker schon vor mehr als einem halben Jahrhundert postulierten, entsteht es in großen Mengen als Nebenprodukt der Kernverschmelzungsprozesse, aus denen die Sonne ihre Energie gewinnt. Abermillionen solcher Sonnenneutrinos sollten demnach in jeder Sekunde auf unseren Planeten treffen – und ihn größtenteils durchqueren, als sei er Luft: Nur jedes Billionste der Spukteilchen wird auf seiner Reise durch den Erdball gestoppt.

Zählen von Geisterteilchen

Für die Physiker war es ein wichtiger Prüfstein ihrer Modelle für den solaren Fusionsreaktor, den Strom der Sonnenneutrinos zu bestimmen und mit dem berechneten Wert zu vergleichen. Aber wie soll man Teilchen zählen, die so schwach mit Materie wechselwirken, dass der gesamte Globus für sie kein Hindernis ist?





ALLE DREI FOTOS: DPA

Raymond Davis jr. (links) und Masatoshi Koshiba (Mitte) erhielten für den Nachweis von Neutrinos aus dem All jeweils ein Viertel, Riccardo Giacconi (rechts) für die Entdeckung kosmischer Röntgenquellen die Hälfte des Physik-Nobelpreises.

Der 1914 in Washington geborene Chemiker Raymond Davis jr. war in den späten 1950er Jahren der Einzige, der sich nicht abschrecken ließ. Mut machten ihm die theoretischen Arbeiten des italienischen Physikers Bruno Pontecorvo. Demnach sollten besonders energiereiche Neutrinos aus einer Nebenreaktion der Fusionsprozesse in der Sonne manchmal mit Atomkernen des Elements Chlor reagieren und dabei einen Argonkern samt einem Elektron freisetzen.

Davis konstruierte deshalb einen völlig neuartigen Detektor von bis dahin unbekannten Dimensionen: einen riesigen Tank, gefüllt mit 615 Tonnen (400 000 Litern) des Reinigungsmittels Tetrachlorethen (Perchlorethylen). Um ihn gegen andere störende Strahlung abzuschirmen, brachte er ihn 1478 Meter unter der Erde in dem Stollen der ehemaligen Homestake-Goldmine in South Dakota unter. Hier würden nach Davis' Berechnungen in jedem Monat zwanzig Neutrinos mit Chloratomen reagieren und dabei ebenso viele Argonatome erzeugen. Die Leistung des Forschers bestand vor allem darin, diese wenigen Edelgas- aus den 2×10^{30} Chloratomen herauszufischen und ihre Anzahl zu ermitteln – die sprichwörtliche Suche nach der Stecknadel im Heuhaufen erscheint dagegen als Kinderspiel.

Davis schaffte das schier Unmögliche, indem er Helium in den Tank einleitete, das die Argonatome mitriss. Doch er erlebte eine böse Überraschung: Er fand viel zu wenig der gesuchten Reaktionsprodukte – nur rund ein Drittel des berechneten Wertes. Und dieses Defizit blieb über die dreißig Jahre, in denen Davis das Experiment laufen ließ, hartnäckig bestehen: Bis 1994 waren statt der etwa 7000 theoretisch zu erwartenden Argonatome insgesamt nur rund 2000 nachgewiesen worden. Da Davis in Kontrollexperimenten zeigen konnte, dass keines im Tank zurückblieb, gab es ein neues Rätsel: Warum kommen nur so wenige Sonnenneutrinos auf der Erde an?

In den 1980er Jahren schloss sich der 1926 geborene Japaner Masatoshi Koshiba der Fahndung nach den Geisterteilchen an. Er benutzte dazu ebenfalls einen gigantischen Tank in einem Bergwerkschacht (der Kamioka-Mine), der allerdings nur mit einfachem Wasser gefüllt war. Ursprünglich sollte er dazu dienen, den Zerfall des Protons zu messen. Doch 1986 wurde Kamiokande, wie der Detektor hieß (für *Kamioka nucleon decay experiment*), für den neuen Zweck umgerüstet. Energiereiche Neutrinos reagieren nämlich auch zuweilen mit Wasser, wobei ein Elektron freigesetzt wird. Dieses bewegt sich zunächst schneller als Licht ▶

in der Flüssigkeit und erzeugt dadurch einen sichtbaren Blitz (er entspricht dem Überschallknall eines Jets). Fotomultiplier rund um den Tank registrierten diese so genannte Tscherenkow-Strahlung.

Der japanische Detektor war dem von Davis in einer Hinsicht überlegen: Mit ihm ließ sich auch die Richtung bestimmen, aus der das nachgewiesene Neutrino kam, und der Zeitpunkt, zu dem es eintraf. Auf diese Weise konnte Koshiba zeigen, dass der Löwenanteil der gemessenen Teilchen tatsächlich von der Sonne stammte. Im Übrigen bestätigte er die für die Theoretiker unbefriedigenden Ergebnisse von Davis.

Doch Kamiokande wies nicht nur solare Neutrinos nach. Am 23. Februar 1987 registrierte der Detektor innerhalb von dreizehn Sekunden zwölf Exemplare, die aus Richtung der 170 000 Lichtjahre von der Erde entfernten Großen Magellanschen Wolke kamen. Als Ursache dieses außergewöhnlichen Teilchenschauers entpuppte sich eine Supernova-Explosion, die erst zwei Stunden später optisch in Erscheinung trat – das spektakuläre Verglühen eines fernen Sterns, bei dem rund 10^{58} Neutrinos freigesetzt wurden.



HIGH-ENERGY ASTRONOMICAL OBSERVATORY



NASA / CXC / SAO

Vor über zwanzig Jahren gelang mit dem Einstein-Röntgen-Observatorium das erste Röntgenbild des Supernova-Überrests Cassiopeia A (oben). Vor drei Jahren lieferte dann der Satellit Chandra die bisher schärfste Röntgenaufnahme des Objekts bei drei verschiedenen Wellenlängen; sie ist hier in Falschfarben wiedergegeben (unten). Für den Bau beider Sonden war Riccardo Giacconi verantwortlich.

Inzwischen ist auch das Rätsel um die fehlenden Sonnenneutrinos gelöst (Spektrum der Wissenschaft 10/2002, S. 21). Einen entscheidenden Beitrag dazu leistete wiederum Koshiba mit einem noch größeren Detektor namens Super-Kamiokande, der 1996 den Betrieb aufnahm. Beobachtungen mit ihm und einer ähnlichen Anlage in Kanada haben deutlich gemacht, dass hinter den zu niedrigen Messwerten so genannte Neutrino-Oszillationen stecken. Demnach wechseln die ursprünglich gebildeten Teilchen auf dem Weg von der Sonne zur Erde teilweise ihre Identität: Sie wandeln sich in andere Neutrinosorten um, die mit den früheren Detektoren nicht nachweisbar waren.

Licht in die Dunkle Materie

Damit ist zugleich eine andere wichtige Frage beantwortet: ob das Neutrino eine Ruhemasse hat. Denn nur in diesem Fall können Neutrino-Oszillationen auftreten. Eine Neutrinomasse, so gering sie auch sein mag, ist äußerst bedeutsam für das Standardmodell der Elementarteilchen und den Aufbau des Universums. Denn Neutrinos zählen zu den häufigsten Teilchen im Kosmos. Wenn sie eine Masse haben, können sie einen Teil jener Dunklen Materie bilden, von der noch immer unklar ist, woraus sie besteht.

All diese wichtigen neuen Erkenntnisse waren Anlass für die Königlich-Schwedische Akademie der Wissenschaften, den beiden Wegbereitern der Neutrino-Astronomie, Davis und Koshiba, zu gleichen Teilen eine Hälfte des diesjährigen Nobelpreises für Physik zuzuerkennen.

Doch zurück zur Röntgenstrahlung. Weil die irdische Lufthülle sie fast völlig verschluckt, war die Beobachtung des Himmels in diesem Spektralbereich lange Zeit unmöglich. Erst 1949 gelang es, mit einem Detektor an Bord einer Rakete nachzuweisen, dass von der Oberfläche der Sonne und von ihrer Korona Röntgenstrahlung ausgeht. Und es dauerte noch einmal zehn Jahre, bis der damals 28-jährige Riccardo Giacconi zusammen mit Bruno Rossi ein Röntgenteleskop entwarf, das an der Spitze einer Trägerrakete weitere mögliche Röntgenquellen im All ausmachen konnte.

Bei einem solchen Raketenflug im Juni 1962 sollte eigentlich geprüft werden, ob der Mond unter dem Einfluss der Sonne in diesem hochenergetischen Bereich leuchtet. Das Ergebnis war negativ (erst 1990 gelang mit dem deutschen Satelliten Rosat eine Röntgenaufnahme des Erdtrabanten). Doch während einer Drehung registrierte das Teleskop plötzlich eine starke Röntgenquelle weit draußen im All, von der später festgestellt wurde, dass sie im Sternbild des Skorpions lag. Außerdem maß es eine kurzwellige Hintergrundstrahlung, die sich gleichmäßig über den Himmel verteilte.

In der Folgezeit ließen sich diverse Röntgenquellen ausmachen und teilweise sichtbaren Objekten zuordnen. Bei den meisten handelte es sich um Doppel-Systeme, in denen beispielsweise zwei Sterne in kurzer Distanz um einen gemeinsamen Schwerpunkt kreisen. Doch das Bild des Kosmos im Röntgenbereich blieb verschwommen, weil die Empfindlichkeit der Detektoren zu wünschen übrig ließ und die Messzeit an Bord der Raketen zu kurz war.

Deshalb initiierte Giacconi den Bau eines Röntgensatelliten, der schließlich 1970 von einem Startplatz in Kenia ins All befördert wurde. Uhuru genannt, was auf Suaheli so viel wie „Freiheit“ bedeutet, war er rund zehnmal so empfindlich wie die bis dahin verwendeten Raketendetektoren und lieferte pro Woche mehr Ergebnisse als alle vorherigen Messungen zusammengenommen.

Und bei Uhuru sollte es nicht bleiben: Acht Jahre später schickten Giacconi und seine Mitstreiter das Einstein-Röntgen-Observatorium ins All, das in puncto Auflösungsvermögen und Empfindlichkeit seinen Vorgänger noch einmal deutlich übertraf (Spektrum der Wissenschaft 4/1980, S. 20). Es konnte selbst Röntgenquellen erkennen, die eine Million Mal schwächer strahlten als Scorpius X-1, das beim ersten Raketenflug per Zufall entdeckt worden war.

Das Einstein-Röntgen-Observatorium lieferte in den kommenden Jahren viele neue Erkenntnisse über das All und trug dazu bei, vor allem energiereiche Prozesse aufzudecken und besser zu verstehen. Dabei verhalf es zu vertieften Einblicken in Röntgendoppelsterne, in die Überreste von Supernovae und in Systeme, in denen ein Schwarzes Loch vermutet wird. Außerdem entdeckte es die ersten Röntgensterne außerhalb des Milchstraßensystems und nahm Röntgenausbrüche ferner aktiver Galaxien ins Visier. Von großer kosmologischer Be- ▶

deutung war der Nachweis des intergalaktischen Gases in Galaxienhaufen, dessen Masse die der sichtbaren Materie in den Sternen bei weitem übersteigt.

Doch Giacconis ehrgeizige Ziele reichten noch weiter. Schon 1976 gab er den Anstoß zum Bau eines verbesserten Teleskops, das noch größer und leistungsfähiger sein sollte. Allerdings sollte es bis 1999 dauern, ehe Chandra – benannt nach dem indischen Astrophysiker Subrahmanyan Chandrasekhar (Physik-Nobelpreis 1983) – schließlich in seine Umlaufbahn um die Erde schwenkte. In Empfindlichkeit und Auflösungsvermögen kann es sich mit dem Hubble-Weltraum-Teleskop messen, das ähnlich scharfe Bilder im sichtbaren und infraroten Spektralbereich liefert und für dessen wissenschaftliches Programm Giacconi als Direktor des Space Telescope Science Institute in Baltimore (Maryland) von 1981 bis 1992 verantwortlich zeichnete.

Bis 1999 war der in Genua geborene Amerikaner dann Generaldirektor der Europäischen Südsternwarte Eso und hatte maßgeblichen Anteil am Bau des Very Large Telescope mit seiner hochmodernen adaptiven Optik, die extrem scharfe Bilder liefert, indem sie den störenden Einfluss von Dichteschwankungen in der Atmosphäre ausgleicht. Trotz seiner 71 Jahre denkt er noch keineswegs an Ruhestand, sondern ist Präsident der Associated Universities in Washington und Professor an der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore.

Für seine herausragenden Leistungen im Bereich der Röntgenastronomie erhielt Giacconi die zweite Hälfte des diesjährigen Physik-Nobelpreises. Ihm ist es zu einem großen Teil zu verdanken, dass sich unser Bild des Universums grundlegend gewandelt hat. Es erscheint weitaus dynamischer als noch vor fünfzig Jahren, geschweige denn zu Zeiten Galileis. Zwar kannte man auch damals schon Supernovae, die innerhalb weniger Tage aufleuchten. Doch die Untersuchung des Himmels im Röntgen- und kurzwelligeren Gammabereich hat deutlich gemacht, dass noch viel rasantere Prozesse im Weltall ablaufen. Dabei setzen Objekte, die kaum größer sind als die Erde, in weniger als einer Sekunde ähnlich viel Energie frei wie die Sonne während ihrer gesamten Lebensdauer. Das Universum ist also keineswegs so statisch und unveränderlich, wie die immer wiederkehrende Kulisse des Nachthimmels uns suggeriert. ■

Thorsten Krome *ist Diplom-Physiker und Redakteur bei wissenschaft-online.*

NOBELPREIS FÜR CHEMIE

Bilder von Biomolekülen – lebensecht und live

Mit raffinierten Ideen schafften es die drei Preisträger, gängige Verfahren zur Identifikation und Strukturbestimmung auf riesige Moleküle auszudehnen, wie sie für die Biologie typisch sind. Seither gelingt deren Abbildung im Naturzustand.

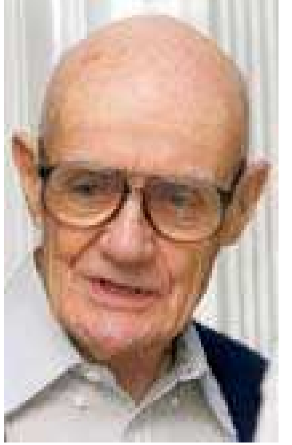
Von Michael Groß

Die molekularen Maschinen der lebenden Zelle sind so klein, dass wir sie grundsätzlich nicht sehen können. Doch es gibt eine Reihe von indirekten Methoden, ihren Aufbau und ihre Gestalt zu ermitteln. Mit Abstand am erfolgreichsten ist die Röntgenstrukturanalyse, die inzwischen mehr als 17 000 detaillierte Bilder von Proteinen geliefert hat – Tendenz: exponentiell steigend. Doch diese Methode erfordert einen Kristall, da sie die Koordinaten der einzelnen Atome anhand der Beugung von Röntgenstrahlen an den Ebenen des Kristallgitters ermittelt. Biomoleküle lassen sich aber nicht immer kristallisieren oder werden beim Übertritt in den Kristallverband möglicherweise in ein künstliches Korsett gezwungen. Deshalb gewinnen zunehmend Methoden an Bedeutung, mit denen sich auch die Raumstruktur von einzelnen Biomolekülen in ihrer natürlichen Umgebung bestimmen lässt.

Bei ihrer Entwicklung haben die Träger des diesjährigen Chemie-Nobelpreises Pionierarbeit geleistet. Ihnen ist es mit raffinierten Tricks gelungen, die Massenspektrometrie (MS) und die Messung der kernmagnetischen Resonanz (NMR für *nuclear magnetic resonance*) so zu erweitern, dass beide Verfahren auf biologische Moleküle anwendbar wurden.

Die NMR-Spektroskopie beruht darauf, dass bestimmte Atomkerne einen Eigendrehimpuls (Spin) haben, der in einem Magnetfeld unterschiedliche Orientierungen annehmen kann. Mit Radiowellen lässt sich ein Übergang zwischen diesen Orientierungen auslösen. Die genaue Frequenz dieser Wellen hängt dabei von der Art des Atomkerns ab und nimmt mit der Stärke des Magnetfeldes zu. Sie wird aber auch durch die chemische Umgebung des einzelnen Atoms und durch die Wechselwirkung mit den Spins von Nachbaratomen beeinflusst. In den resultierenden Verschiebungen der Absorptionsfrequenz verbirgt sich die gewünschte Information über die Struktur.

Allerdings sind sie unvorstellbar klein. Die Maßeinheit ist ein Millionstel der Anregungsfrequenz. Es grenzt schon


ALLE DREI FOTOS: DPA

Kurt Wüthrich (links) von der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich erhielt für die Entwicklung von Methoden zur Aufklärung der räumlichen Struktur großer Biomoleküle in Lösung die eine Hälfte des Chemie-Nobelpreises. Die andere Hälfte teilen sich John Fenn (Mitte) von der Virginia-Commonwealth-Universität in Richmond und Koichi Tanaka von der Firma Shimadzu in Kioto. Sie wurden für die Ausweitung der Massenspektrometrie auf große Biomoleküle ausgezeichnet.

(Seiten 18, 19 und 20: Anzeige und Beihefter)

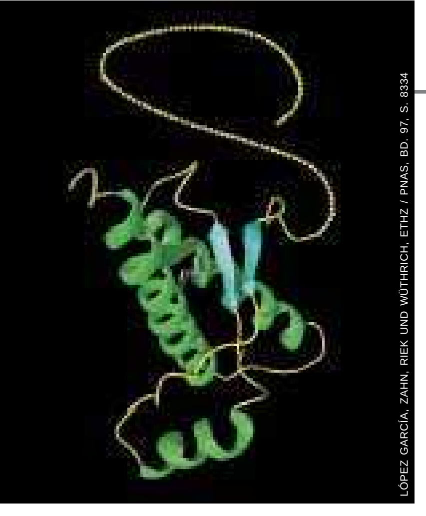
nachgerade an ein Wunder, dass man dennoch vollständige Proteinstrukturen aus einem NMR-Röhrchen mit einem halben Milliliter Proteinlösung herauszaubern kann. Die einfallsreiche Kombination mathematischer Auswertungsmethoden mit quantenmechanischen Tricks hat hier das Unmögliche möglich gemacht.

Beobachtung im gelösten Zustand

Bahnbrechende Beiträge dazu leistete über die letzten drei Jahrzehnte hinweg Kurt Wüthrich, Jahrgang 1938, mit seiner Arbeitsgruppe an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich. Dafür wurde er nun mit der Hälfte des diesjährigen Nobelpreises für Chemie geehrt. Schon in den 1970er Jahren entwickelte Wüthrich in Zusammenarbeit mit Richard Ernst (Chemie-Nobelpreis 1991) die Standardmethode der sequenziellen Zuordnung von NMR-Signalen zu Atomkernen. Sie stützt sich auf eine Kombination zweier Arten der zweidimensionalen NMR-Spektroskopie. Die eine namens Cosy (*correlated spectroscopy*) ermöglicht es, die spektroskopischen Eigenheiten eines gegebenen Molekülteils zu ermitteln. Auf deren Basis lassen sich mit der anderen Methode namens Noesy (*nuclear Overhauser effect spectroscopy*) die Abstände zu anderen Molekülteilen bestimmen. Auf diese Weise konnte Wüthrichs Arbeitsgruppe 1985 die erste Proteinstruktur aufklären. Inzwischen stammen 20 Prozent der Strukturen, die in der Protein Data Bank aufgelistet sind, von NMR-Untersuchungen.

Heute kommen noch kompliziertere Methoden zum Einsatz. Dabei werden beispielsweise gezielt an einzelnen Stellen eines Proteins seltene Isotope des betreffenden Atoms eingebaut (etwa Stickstoff-15 statt Stickstoff-14). Außerdem nimmt man oft nicht mehr nur zwei-, sondern dreidimensionale Spektren auf. Diese Verfahren, an deren Entwicklung Ad Bax vom amerikanischen Nationalinstitut für Diabetes sowie für Erkrankungen des Verdauungsapparats und der Nieren in Bethesda (Maryland) wesentlich beteiligt war, haben die Obergrenze für die Masse eines Moleküls, das sich noch erfolgreich untersuchen lässt, von rund 15 auf knapp 30 Kilodalton verdoppelt.

Auch dabei bleibt freilich ein Großteil der biologisch relevanten Moleküle ausgeschlossen. Daher gibt es Bemühungen, diese Grenze weiter nach oben zu treiben. Sie stützen sich wiederum auf



LÓPEZ GARCÍA, ZAHN, RIEK UND WÜTHRICH, ETHZ / PNAS, BD. 97, S. 8334

Mit der von Kurt Wüthrich weiterentwickelten Methode der NMR-Spektroskopie konnten er und sein Team die Struktur des Prionproteins bestimmen, das in einer pathologischen Variante den Rinderwahnsinn auslöst. Wie sich zeigte, ist die Hälfte der Aminosäurekette frei beweglich.

neue Methoden aus Wüthrichs Labor. So bringt das so genannte Trosy-Verfahren (*transverse relaxation-optimized spectroscopy*) die stärksten heute erhältlichen Magnete noch besser zur Wirkung. Theoretiker erwarten von der nächsten Generation von Magneten, in denen die Resonanzfrequenz des Wasserstoffs bei 1000 Megahertz liegen wird (gegenüber den

bisher üblichen 500 oder 600 Megahertz), Trosy-Spektren mit nahezu perfekter Signalschärfe. Dann dürfte es für Strukturanalysen auf NMR-Basis praktisch keine Grenzen mehr geben.

Indem die kernmagnetischen Methoden Biomoleküle in Lösung untersuchen, zeigen sie deren Struktur unter annähernd natürlichen Bedingungen. Dabei lässt sich unter anderem auch erkennen, ob es Bereiche in einem Molekül gibt, die ungeordnet sind oder ihre Struktur rasch ändern. Ein Beispiel dafür liefert das Prionprotein, dessen krankhaft veränderte Form als Verursacher des Rinderwahnsinns gilt. Wüthrich und seine Mitarbeiter konnten zeigen, dass nur etwa die Hälfte der Eiweißkette in wässriger Lösung in einer definierten Struktur vorliegt, während der Rest frei beweglich ist (Spektrum der Wissenschaft 9/1996, S. 16).

Außer für die Grundlagenforschung wird das NMR-Verfahren inzwischen auch industriell eingesetzt. Die wohl größte Bedeutung hat es für die Entwicklung neuer Medikamente. Dabei geht es um die Suche nach Stoffen, die sich selektiv an eine bestimmte Zielstruktur – etwa das aktive Zentrum eines Enzyms – im Körper heften und dabei der Substanz, die sich normalerweise dort anlagert, den Zutritt verwehren oder ihre Wirkung nachahmen. Da die Bindung eines Moleküls das NMR-Spektrum der Zielstruktur ändert, eignet sich das Verfahren hervorragend, um unter großen Mengen von Kandidaten einfach und schnell die viel versprechenden herauszufischen.

Der sanfte Weg zum Wiegen

Die zweite Hälfte des Chemie-Nobelpreises teilen sich zwei Forscher für die Fortentwicklung einer Methode, bei der Moleküle ebenfalls nicht in kristallisierter Form, aber auch nicht in Lösung untersucht werden. Stattdessen bringt man sie in die Gasphase und ionisiert sie. Dabei entsteht ein Strahl von geladenen Molekülen. Diese können mit verschiedenen Methoden – etwa anhand ihrer Flugzeit bis zum Detektor oder ihrer Ablenkung in einem Magnetfeld – nach ihrem Verhältnis von Ladung zu Masse getrennt werden. Aus ihm lässt sich dann auf das Molekulargewicht zurückschließen. Das als Massenspektrometrie bezeichnete Verfahren ist seit vielen Jahrzehnten Standard in der organischen Chemie – allerdings nur für relativ kleine Moleküle.

Der Engpass, der die Untersuchung von größeren Verbindungen lange Zeit erschwerte, war nicht etwa die eigentliche Messung, sondern die Ionisierung der Proben. In der organischen Chemie verwendet man dafür recht brutale Methoden, die kein Biomolekül überleben würde. Die Preisträger John Fenn und Koichi Tanaka entwickelten schonende Alternativen, nämlich die Elektrospray-Ionisation (ESI) beziehungsweise die sanfte Laser-Desorption (SLD).

Schonendes Verdunsten von Biomolekülen

Das Problem bei der Massenspektrometrie von Biomolekülen war, diese schonend in die Gasphase zu bringen und zu ionisieren. John Fenn löste es mit der Elektrospray-Ionisation (ESI), bei der eine Lösung der Probesubstanz in einem elektrischen Feld zerstäubt wird. Alternativ dazu entwickelte Koichi Tanaka die sanfte Laser-Desorption (SLD). Dabei wird das Biomolekül zunächst an einer Unterlage adsorbiert und von dieser mit schwachen Laserpulsen in den Gaszustand katapultiert. In beiden Fällen erzeugt eine Lochblende einen Strahl, in dem sich die geladenen Teilchen – etwa anhand ihrer Laufzeit – nach ihrem Verhältnis von Ladung zu Masse auftrennen lassen. Aus dem erhaltenen Spektrum ergibt sich dann ihre Masse. Beim ESI-Verfahren liefert die Mittelung über die Peaks für verschieden geladene Moleküle einen besonders genauen Messwert.

NOBEL-STIFTUNG

John Fenn, Jahrgang 1917, bildet insofern eine Ausnahme unter den Nobel-Laureaten, als er die preiswürdige Leistung erst kurz vor dem Ende seiner Karriere vollbrachte. Den Durchbruch für das ESI-Verfahren erzielte er im Jahr seiner Emeritierung von der Yale-Universität in New Haven (Connecticut): Auf einer Konferenz berichtete er 1988 über die erfolgreiche Analyse von Proteinen mit bis zu vierzig Kilodalton Molekulargewicht.

Wie der Name des Verfahrens schon andeutet, sprüht man die Probenlösung durch eine feine Düse in ein starkes elektrisches Feld – mit einer Spannung von immerhin 3000 Volt. Die entstehenden winzigen Tröpfchen werden weiter eingedampft, bis die nackten Biomoleküle zurückbleiben. Diese sind typischerweise verschieden stark geladen und liefern deshalb mehr als ein Dutzend getrennte Signale. Fenn erkannte als Erster, dass dies kein Problem, sondern eine willkommene Quelle zusätzlicher Informationen ist. So lassen sich aus den Einzelsignalen unabhängige Werte für die Masse gewinnen. Durch Mittelung erhält man dann erstaunlich genaue Ergebnisse, die ▶

etwa bei einem mittelgroßen Protein mit einem Molekulargewicht von zwanzig Kilodalton Auskunft über die An- oder Abwesenheit eines Wasserstoffatoms geben. Außerdem verrät die Häufigkeitsverteilung der Ladungen einiges darüber, wie kompakt die Proteinmoleküle zum Zeitpunkt der Ionisierung gefaltet waren.

Die rasche Entwicklung immer besserer kommerzieller ESI-Spektrometer und die Ausweitung der Anwendungsmöglichkeiten bis in den Megadalton-Bereich machten das Elektrospray-Verfahren in den 1990er Jahren zu einer beliebten Methode in Biochemie-Labors in aller Welt. In unzähligen Forschungsprojekten wurden Massenspektren von immer größeren und komplexeren Biomolekülen aufgenommen. Es geht das Gerücht, dass sogar ein komplettes Virus nicht nur gemessen worden, sondern anschließend noch infektiös gewesen sei.

Auch lose zusammengesetzte Komplexe aus mehreren Enzymen lassen sich per ESI untersuchen. Das eröffnet die Chance, Wechselwirkungen zwischen Proteinen zu untersuchen. Damit gewinnt man Einblicke in das komplizierte Netzwerk ihrer gegenseitigen Beziehungen, das die Zellmaschinerie in Gang hält. Kein anderes Verfahren kann so schnell, empfindlich und zielsicher lockere Verbände von Biomolekülen aufspüren.

Dabei kommt eine weitere Stärke der Elektrospray-Ionisation zum Tragen: ihr extrem geringer Materialbedarf. Wie sich zeigte, verbessern sich die Ergebnisse sogar, wenn man die Fließgeschwindigkeit bei der Probeneingabe so niedrig wie möglich einstellt. Nanoflow-Verfahren, bei denen Probenvolumina im Bereich von Nanolitern (millionstel Millilitern) injiziert werden, sind heute üblich.

Dass ESI trotz all dieser Vorzüge nicht einzig dasteht, ist dem dritten Preisträger zu verdanken, der gleichfalls 1987/88 die Laser-Desorptionsmethode entwickelte. Im Alter von nicht einmal dreißig Jahren zeigte der 1959 geborene Koichi Tanaka von der Firma Shimadzu in Kioto, dass man durch geschicktes Kombinieren eines geeigneten Adsorptionsmaterials und relativ schwacher Laserpulse Biomoleküle, die zunächst an den Feststoff adsorbiert wurden, schonend in die Gasphase katapultieren kann.

Der wichtigste Gesichtspunkt beim Zusammenstellen der Komponenten ist, dass das Biomolekül kein Licht in dem Spektralbereich absorbieren darf, den der Laser aussendet. Für Proteine erfüllt zum Beispiel ein Stickstoff-Laser mit 330 Nanometern Wellenlänge diese Bedingung. Das Material, das dem Biomolekül als Startrampe dient, sollte hingegen die eingestrahlte Energie aufnehmen und dadurch so ins Vibrieren geraten, dass es die zu untersuchenden Moleküle ins Vakuum schleudert.

Tanaka entwickelte seine Methode zunächst mit einem Substrat aus Glycerin und Kolloid-Partikeln. Inzwischen wurde es jedoch von noch besser geeigneten Adsorptionsmaterialien verdrängt. Die derzeit gängige Variante der Laser-Desorption ist als Maldi (für *matrix-assisted laser desorption ionization*) bekannt.

Gemeinsam ermöglichen ESI und SLD heute biochemische Analysen, von denen Forscher noch vor wenigen Jahren nur zu träumen wagten. So kann man damit in kurzer Zeit den Gehalt einer Zelle an großen Biomolekülen bestimmen. Es gibt aber auch bedeutende Anwendungen in Pharmaforschung und Medizin – etwa zur Früherkennung von Malaria oder von bestimmten Krebsarten. In der Nahrungsmittelüberwachung haben sich die beiden Verfahren inzwischen gleichfalls einen festen Platz erobert. Sie helfen nicht nur mögliche Schadstoffe zu erkennen, sondern auch Bedingungen zu finden, unter denen diese gar nicht oder nur in sehr geringer Menge entstehen. ■

__Michael Groß__ hat als promovierter Chemiker am Oxford Centre for Molecular Sciences selbst NMR- und ESI-Untersuchungen eingesetzt, um zu ergründen, wie molekulare Anstandsdamen (Chaperone) ihre Schützlinge – frisch synthetisierte Eiweißketten – erkennen und ihnen zur rechten Form verhelfen. Er ist heute als freier Autor mit dem Birkbeck-College in London assoziiert.

NOBELPREIS FÜR WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFT

Der *Homo oeconomicus* auf dem Prüfstand

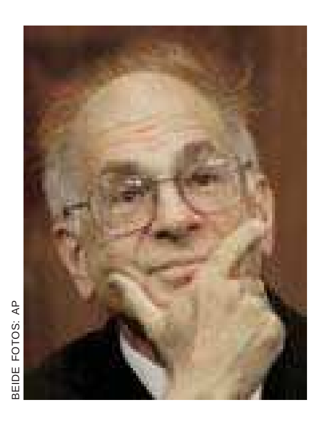
Die diesjährigen Preisträger haben ihre Disziplin um ein neues, ungewohntes Forschungsmittel bereichert: das Experiment.

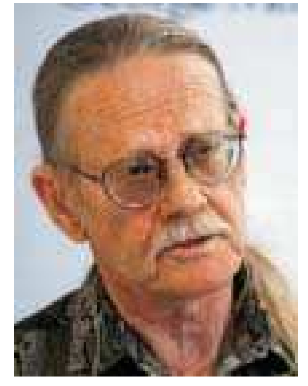
Von Christoph Pöppe

Der Rang der Wirtschaftswissenschaft unter den exakten Wissenschaften ist nicht ganz unangefochten. Sie ist so jung, dass Alfred Nobel noch keinen Anlass hatte, auch ihr einen Preis zu stiften – das hat erst 1968 die schwedische Reichsbank in seinem Namen nachgeholt. Zudem sind die Gesetze, deren Folgen sie studiert, die des menschlichen Verhaltens und damit weit weniger universell als die der Natur. Obendrein scheint sie mit der Meteorologie und der Astronomie das traurige Schicksal zu teilen, ihren Gegenstand nicht durch das Experiment gezielt befragen zu können: Es bleibt ihr nichts übrig, als ihre Theorien mit Hilfe sorgfältiger Beobachtung zu bilden und zu überprüfen.

Das war zumindest die hergebrachte Auffassung. Das Verdienst der diesjährigen Nobelpreisträger besteht darin, dieses Vorurteil widerlegt und in mehr als dreißigjähriger Arbeit das Experiment zum verlässlichen und aussagekräftigen Forschungswerkzeug auch in der Ökonomie gemacht zu haben.

Da es wesentlich um die Motive geht, die ein Wirtschaftssubjekt zu dieser oder





BEIDE FOTOS: AP

Den Wirtschafts-Nobelpreis teilen sich Daniel Kahneman (links) von der Universität Princeton (New Jersey) für die Einführung psychologischer Aspekte in die Wirtschaftstheorie und Vernon L. Smith von der George-Mason-Universität in Arlington (Virginia) für die Einführung von Laborexperimenten in die Wirtschaftswissenschaft.

jener Entscheidung veranlassen, nimmt es nicht wunder, dass einer der Preisträger Seelenforscher ist: Daniel Kahneman, 1934 in Tel Aviv geboren und zugleich israelischer wie amerikanischer Staatsbürger, lehrt Psychologie an der Universität Princeton (New Jersey). Gemeinsam mit seinem Landsmann und Fachkollegen Amos Tversky, der durch seinen Tod 1996 die gleichfalls verdiente Nobelpreiswürde verpasste, stellte er Versuchspersonen vor Alternativen der folgenden Art: „Würden Sie lieber 80 Dollar auf die Hand bekommen oder an einem Glücksspiel teilnehmen, bei dem Sie mit 85 Prozent Wahrscheinlichkeit 100 Dollar bekommen und mit 15 Prozent gar nichts?“

Die meisten Leute entscheiden sich für die 80 Dollar und lassen sich nicht auf die Lotterie ein. Das ist insofern bemerkenswert, als jeder vernünftig handelnde Mensch die Lotterie bevorzugen müsste.

Die Größe, auf die es ankommt, ist nämlich der so genannte Erwartungswert: Man nehme das, was ein gewisses Ereignis einbringt, mal der Wahrscheinlichkeit seines Eintretens und zähle diese Produkte für alle denkbaren Ereignisse zusammen. Der Erwartungswert der Auszahlung aus der genannten Lotterie beträgt demnach 85 Dollar und ist damit höher als die sichere Auszahlung von 80 Dollar.

Die klassische Wirtschaftstheorie betrachtet den Menschen als „rationalen Nutzenmaximierer“: Erstens ist er auf seinen eigenen Vorteil bedacht und nichts sonst; zweitens verfügt er über genügend Informationen, um die Chancen, die das Glücksspiel Leben ihm bietet, realistisch einzuschätzen („Das Risiko, dass das Auto in den nächsten zwei Jahren zusammenbricht, ist kleiner als 30 Prozent“); drittens berechnet er nach den Regeln der Wahrscheinlichkeitsrechnung für jede Handlungsalternative („TÜV oder Verschrotten“) den Erwartungswert des Nutzens und entscheidet sich dann für diejenige mit dem höchsten Wert.

Dass die meisten Menschen in Wahrheit die Regeln der Wahrscheinlichkeitsrechnung nicht beherrschen und ihre Einschätzungen zukünftiger Chancen sehr nebelhaft sind, tut der Theorie zunächst noch keinen Abbruch. Vielleicht wenden wir die Rechenregeln ja intuitiv richtig an, so wie wir auf dem Fahrrad das Gleichgewicht halten, ohne über Kräfteparallelogramme auch nur nachzudenken. Und wenn der eine die Lebenserwartung seines Autos maßlos über- und der andere sie ebenso maßlos unterschätzt, dann ärgern sich zwar hinterher beide Autobesitzer, aber nicht der Theoretiker; denn für den mitteln sich individuelle Schätzfehler einfach aus.

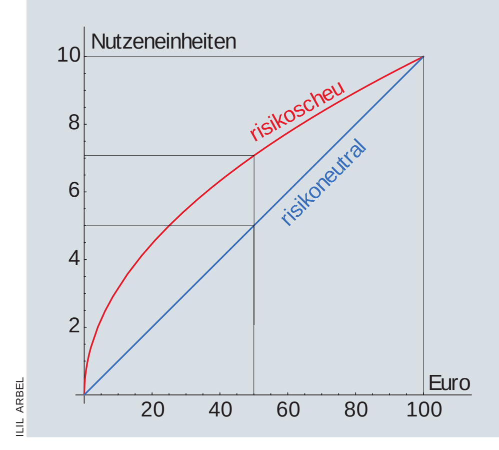
Konkave Nutzenfunktionen

Die Überdrusskurve

Je reicher ich bin, desto weniger Wert lege ich auf jeden zusätzlichen Euro. Mein subjektiver „Nutzen“, den ich aus meinem Vermögen ziehe, lässt sich also durch eine Kurve darstellen, die zwar stets ansteigt, deren Steigung mit zunehmendem Reichtum aber immer geringer wird.

Ein (willkürliches) Beispiel für eine solche „konkave“ Nutzenfunktion ist die Wurzelfunktion (rote Kurve): Ein Vermögen von N Euro ist mir $\sqrt{N}$ Nutzeneinheiten wert. 50 Euro zu haben beglückt mich also mit $\sqrt{50} = 7{,}07$ Nutzeneinheiten und 100 Euro mit 10 Nutzeneinheiten. Eine Lotterie, bei der ich mit 50 Prozent Wahrscheinlichkeit 100 Euro gewinne, hat für mich einen erwarteten Nutzen von $0{,}5 \times 10 = 5$ Einheiten. Das ist weniger als die 7,07 Einheiten, die ich aus 50 sicheren Euro ziehe, weswegen ich grundsätzlich risikoscheu bin.

Für eine risikoneutrale Person ist dagegen der Nutzen proportional dem Reichtum (blaue Gerade) und deswegen die angebotene Lotterie ebenso viel wert wie der Erwartungswert ihres Gewinns: 50 Euro.



ILIL ARBEL

Kahneman und Tversky fanden bei ihren Experimenten jedoch nicht nur zufällige, sondern systematische Schätzfehler (siehe ihren Artikel „Risiko nach Maß – Psychologie der Entscheidungspräferenzen“, Spektrum der Wissenschaft 3/1982, S. 89). So sind wir einerseits unangemessen risikoscheu – indem wir den 80-Dollar-Spatz in der Hand der 100-Dollar-Taube auf dem leicht erreichbaren Dach vorziehen –, andererseits aber irrational risikofreudig, wenn es dagegen darum geht, etwas zu verlieren statt zu gewinnen: Bevor wir einen sicheren Verlust hinnehmen, lassen wir uns lieber auf ein Glücksspiel mit weitaus schlechterem Erwartungswert ein. Generell kommt es darauf an, wo der Mensch den Bezugspunkt seiner Finanzen setzt, oberhalb dessen alles als Gewinn und unterhalb alles als Verlust zählt.

Ursachen der Unvernunft

Eigentlich ist es auch belanglos, ob ich von einer Lotterie, deren Ziehung in zwei Stufen abläuft, das Zwischenergebnis erfahre oder nicht. Gleichwohl bewerten Versuchspersonen die beiden äquivalenten, aber unterschiedlich präsentierten Lotterien deutlich verschieden. Das ist das so genannte Allais-Paradox.

Sind wir also in unseren wirtschaftlichen Entscheidungen hoffnungslos irrational? Keineswegs. Kahneman und Tversky haben aus den Ergebnissen ihrer Experimente eine Theorie entwickelt, die zumindest einige unserer systematischen Fehler erklärt. Im Gegensatz zum theoretischen *Homo oeconomicus* müssen wir unsere Entscheidungen in der Regel auf spärliche Informationen gründen. Darum neigen wir zwangsläufig dazu, Einzelereignisse für bedeutsamer zu nehmen, als sie sind – mit dem Effekt, dass wir geringe Wahrscheinlichkeiten systematisch über- und große unterschätzen. Mit den so verfälschten Werten sehen dann in der Tat äquivalente Lotterien verschieden aus, was das Allais-Paradox erklärt.

Unsere systematische Risikoscheu wird dagegen aus einer Alltagserfahrung verständlich: Das zweite Stück Kuchen zum Kaffee schmeckt nicht mehr ganz so gut wie das erste, zwei Autos machen weniger als doppelt so viel Vergnügen wie eines, und die zweite Million beglückt ihren Besitzer weitaus weniger als die erste. Wer diesem Prinzip folgt, bewertet konsequenterweise eine sichere Einnahme höher als eine Lotterie mit gleichem Erwartungswert (siehe Kasten).

Die Experimente des zweiten Preisträgers Vernon L. Smith beschäftigen sich ebenfalls damit, die Motive der Wirtschaftssubjekte zu ergründen, aber auf umgekehrtem Wege: Während Kahneman seine Versuchspersonen fragt, was sie am liebsten wollen, gibt Smith ihnen vor, was sie zu wollen haben, beobachtet dann, ob ihr Verhalten dem echter Marktteilnehmer entspricht, und schließt daraus zurück, ob er ihnen realistische Motive vorgeschrieben hat (siehe „Experimentelle Marktwirtschaft“ von Vernon L. Smith ▶

und Arlington W. Williams, Spektrum der Wissenschaft 2/1993, S. 68).

Smith, heute Professor für Wirtschafts- und Rechtswissenschaften an der George-Mason-Universität in Arlington (Virginia), schickt seine Versuchspersonen auf einen fiktiven Markt, auf dem sie als Käufer oder Verkäufer eines ebenfalls fiktiven Gutes auftreten sollen – sagen wir Äpfel (im Deutschen hat sich der Name „Apfelmarkt“ eingebürgert). Dabei gibt er ihnen jeweils ein persönliches Geheimnis mit: jedem Verkäufer einen *reservation price*, den man sich am besten als Selbstkostenpreis vorstellt, denn darunter darf er seinen Apfel nicht verkaufen, und die Differenz zwischen Verkaufs- und Selbstkostenpreis bleibt ihm als Gewinn. Entsprechend bekommt jeder Käufer vorgeschrieben, was ihm der Besitz eines Apfels wert ist. Die Differenz zwischen dieser Schmerzgrenze und dem Kaufpreis kann er als Gewinn einstreichen. Um die Versuchsteilnehmer zu realistischem Denken anzuhalten, sind diese Gewinne im Gegensatz zu den Äpfeln nicht fiktiv, sondern werden am Ende ausgezahlt.

Käufer wie Verkäufer tun – im Experiment wie in der Realität – gut daran, ihre persönlichen Geheimnisse für sich zu behalten. Sie müssten sonst befürchten, nur Angebote in unangenehmer Nähe ihrer jeweiligen Schmerzgrenze zu erhalten. Aus diesem Grund sind diese Grenzpreise in der Realität kaum beobachtbar, was den Ansatz von Smith, mit künstlich gesetzten Werten dafür zu arbeiten, so attraktiv macht.

Auf dem Markt handeln nun Käufer und Verkäufer den Preis jedes einzelnen Apfels aus, indem sie nach Belieben Kauf- und Verkaufsangebote in den Raum werfen, bis ein Käufer oder Verkäufer den zuletzt genannten Preis akzeptiert. In dieser *double oral auction* stellt sich regelmäßig nach wenigen „Markttagen“ ein Gleichgewichtspreis ein, zu dem – mit geringen Abweichungen – praktisch alle Geschäfte abgeschlossen werden (Kasten).

Simulation von Börsenkrächen

Im weiteren Verlauf seiner Forschungen ging Smith über seinen ursprünglichen Ansatz hinaus, durch seine Vorgaben die unbeobachtbaren Motive echter Marktakteure zu imitieren. Nun variierte er, bei ansonsten unverändertem Aufbau des Experiments, die Marktbedingungen. Welche Gleichgewichtspreise stellen sich ein, und wie schnell, wenn beispielsweise die Verkäufer gezwungen werden, sich an ihren erstgenannten Preis zu halten? Oder wenn die Käufer nicht selbst Preise nennen dürfen, sondern nur die Wahl haben, von den immer tiefer sinkenden Angeboten des (einzigen) Verkäufers das bisher letzte zu akzeptieren oder auch nicht, wobei der erste Käufer, der akzeptiert, zum Zuge kommt (die „holländische Auktion“)? Oftmals erhielten Smith und seine Nachfolger Ergebnisse, die eine Revision gängiger Theorien erzwangen.

In weiteren Experimenten gelang es ihnen sogar, spekulative Überhitzung von Märkten und Börsenkräche zu provozieren – Phänomene, die unter rational denkenden Marktteilnehmern theoretisch nicht vorkommen können, in der Realität jedoch offensichtlich stattfinden.

Die offizielle Darstellung der Schwedischen Akademie der Wissenschaften nennt zu den Laureaten nur wenige Vorläufer. Immerhin führte Reinhard Selten, Wirtschafts-Nobelpreisträger von 1994, schon 1959 Experimente zur Preisbildung in oligopolistischen Märkten durch. Sein Mitpreisträger John Nash (der Held des Films „A Beautiful Mind“) verglich 1954 gemeinsam mit Kollegen die Ergebnisse von Experimenten mit den Vorhersagen der von ihm maßgeblich geprägten Spieltheorie.

Nachfolger gibt es dafür umso mehr. In der heutigen Wirtschaftsforschung gehört der experimentelle Zweig, gemessen an Veröffentlichungen und Konferenzen, zu den aktivsten. Der Einfluss der Preisträger auf ihr Fachgebiet ist kaum zu überschätzen. Der 1979 in der renommierten Zeitschrift „Econometrica“ publizierte Beitrag „Prospect theory: An analysis of decision under risk“ ist der meistzitierte Artikel dieser Zeitschrift.

Zu den neueren Experimenten zählen das Ultimatumspiel und seine Verwandten, über die Karl Sigmund, Ernst Fehr und Martin A. Nowak in dieser Zeitschrift berichtet haben (3/2002, S. 52). Die Ergebnisse zeigen nicht nur, dass wir Menschen uns regelmäßig Vorteile entgehen lassen, die der *Homo oeconomicus* selbstverständlich annehmen würde; es stellt sich auch heraus, dass wir mit diesem Verhalten am Ende besser dastehen.

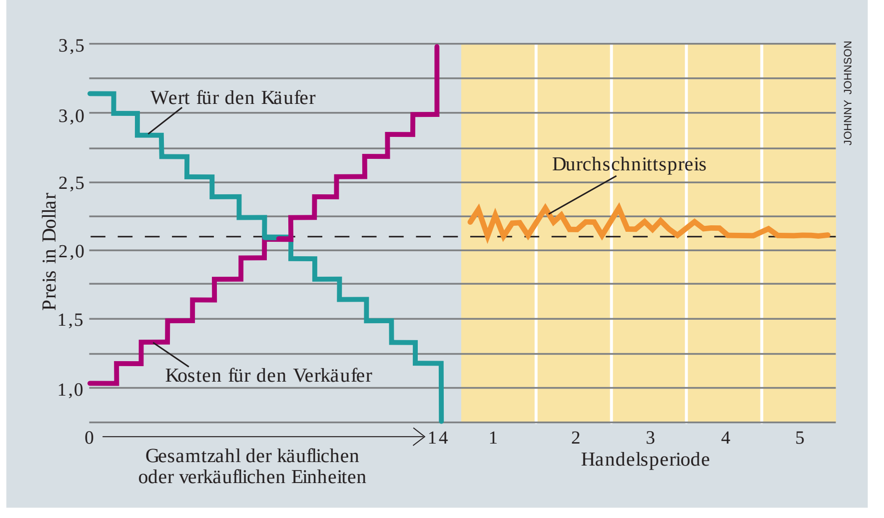
Damit ist die Fiktion vom rationalen Nutzenmaximierer weiter demontiert: Er ist nicht nur in der Natur eher selten, sondern auch noch ziemlich ungeschickt. Jedenfalls verfehlt er sein ureigenstes Ziel, nämlich sein persönliches Wohlergehen, gegenüber denen, die dieses Ziel hinter brotlosen Idealen wie Fairness – oder Vergeltung – zurückstehen lassen. ■

Christoph Pöppe *ist Mathematiker und Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.*

Gleichgewicht von Angebot und Nachfrage

Der Apfelmarkt

Für ein Marktexperiment von Vernon L. Smith gibt der Experimentator den Käufern interne Werte („Schmerzgrenzen“) und den Verkäufern interne Kosten („Selbstkostenpreise“) vor – und zwar so, dass die gezeigten Treppenkurven herauskommen. Die Angebotsfunktion (rote Treppe) zeigt zu jeder Anzahl von Äpfeln den Preis (pro Apfel) an, für den man diese Anzahl erstehen könnte. Entsprechend sagt die Nachfragefunktion (blaue Treppe), zu welchem Preis die Käufer die jeweils gegebene Anzahl von Äpfeln zu kaufen bereit wären. Im Experiment konvergieren die Preise, zu denen die fiktiven Äpfel den Besitzer wechseln, rasch gegen den Gleichgewichtspreis, bei dem sich Angebot und Nachfrage decken (gestrichelte Linie).



Ätna aus dem All



MITTE: NASA / GSFC / METI / ERSDAC / JAROS / ASTER SCIENCE TEAM, RECHTS OBEN: JACQUES DESCLOITRES / NASA-GSFC, LINKS UNTEN: NASA-JSC

Als der Ätna am 27.10. nach gut einem Jahr Ruhe wieder ausbrach, wurde die Eruption des größten und aktivsten europäischen Vulkans so umfassend aus dem All verfolgt wie keine zuvor. Hier sind drei besonders eindrucksvolle Aufnahmen gezeigt. Die größte hat das Instrumentensystem Aster auf dem im Februar 2000 gestarteten Erdbeobachtungssatelliten Terra am 3.11. gemacht. Zu sehen sind mehrere dunkle Asche- und weiße Dampfsäulen, die nach Süden über Catania ziehen. Einen größeren Ausschnitt (rechts oben) erfasste am 28.10. der Sensor Modis auf dem Satelliten Aqua, der im Mai dieses Jahres in die Umlaufbahn ging. Am zweiten Tag des heftigen Ausbruchs erstreckte sich die Aschewolke bereits sechs Kilometer hoch und reichte 400 Kilometer weit bis Libyen. Aus einer etwas anderen Perspektive – schräg von Nordwesten – haben Besatzungsmitglieder der Internationalen Raumstation ISS die Eruption am 30.10. eingefangen (links unten). Auf dem räumlich wirkenden Foto sind die unterschiedlichen Ausbruchsstellen gut zu erkennen. Rauchwolken in tieferen Regionen stammen teilweise von Waldbränden, welche die Lavaströme verursachten.

URKNALL

Auf der Suche nach dem Quanten-Ursprung der Zeit

Die kosmische Hintergrundstrahlung, ein schwaches Nachleuchten des Urknalls, erfüllt den Weltraum nicht völlig gleichförmig. Genaue Messungen dieser Unregelmäßigkeiten könnten einen Hinweis auf den Quanten-Ursprung von Raum und Zeit geben.

Von Craig J. Hogan

Der Nachthimmel ist nie wirklich dunkel. Sogar in den entlegensten Regionen des Alls erfüllt die kosmische Hintergrundstrahlung den gesamten Raum nahezu gleichmäßig in allen Richtungen. Diese Strahlung entstand in den ersten Augenblicken unseres expandierenden Universums und ist die Quelle der Energie, aus der die Materie hervorging. Seit Anbeginn gestaltet das Licht die Entwicklung des Kosmos – seine Zusammensetzung und Struktur – und wird selbst davon geprägt. Im frühen Universum war Strahlung die dominierende Form von Energie; Materie war nur ein Spurenstoff. Noch heute hat die Hintergrundstrahlung mehr Energie als das Licht sämtlicher Sterne im Weltall. Der Nachthimmel erscheint uns nur deshalb dunkel, weil die Wellenlänge der Hintergrundstrahlung im Millimeterbereich liegt. Dieses kalte Licht – es entspricht einer Temperatur von kaum drei Grad über dem absoluten Nullpunkt – ist für unsere Augen unsichtbar; doch vor langer Zeit strahlte das All viel heißer als das Innere eines Sterns.

Neue Beobachtungen mit Spezialteleskopen, die auf Ballons und Satelliten oder an so exotischen Orten wie dem Südpol stationiert wurden, haben winzige Unregelmäßigkeiten in der Hintergrundstrahlung enthüllt. Dieses Strahlungsmuster spiegelt das Muster der Gravitation im sehr frühen Universum wider. Eine genaue Erforschung der Strahlungsflecken vermehrt unser Wissen über die globalen Eigenschaften des Universums. Wir gewinnen daraus präzise Informationen über die Größe des Kosmos, sein Alter und seine Zusammensetzung. Hier werde ich allerdings eine prinzipiellere Erkenntnis diskutieren, die möglicherweise unser Bild von Raum und Zeit, von Materie und Energie sowie von deren Herkunft und Zusammensetzung in neuem Licht erscheinen lässt.

Eine grundlegende Wahrheit über den Kosmos besagt, dass in ihm das Größte und das Kleinste ein und dasselbe sind. Für diese scheinbar paradoxe Aussage gibt es einen unmittelbar anschaulichen Beleg. Wenn wir die Abweichungen

IN KÜRZE

➤ Die **kosmische Hintergrundstrahlung** erfüllt den Weltraum fast völlig gleichförmig in allen Richtungen. Sie entspricht dem Spektrum eines schwarzen Körpers bei einer Temperatur von knapp drei Grad über dem absoluten Nullpunkt und wird als Reststrahlung des Urknalls interpretiert, mit dem das All vor rund 14 Milliarden Jahren seinen extrem heißen und dichten Anfang nahm.

➤ Hochauflösende Kartierungen dieses Strahlungshintergrunds enthüllen darin **kleine Fluktuationen**: ein wenig wärmere und kühlere Flecken.

➤ Kosmologen vermuten in dieser Anisotropie der Hintergrundstrahlung die durch die Expansion des Universums enorm vergrößerten Spuren der uranfänglichen **Quantenstruktur von Raum und Zeit**.



DUMBARTON OAKS, BYZANTINE PHOTOGRAPH AND FIELDWORKS ARCHIVES, WASHINGTON, D. C.

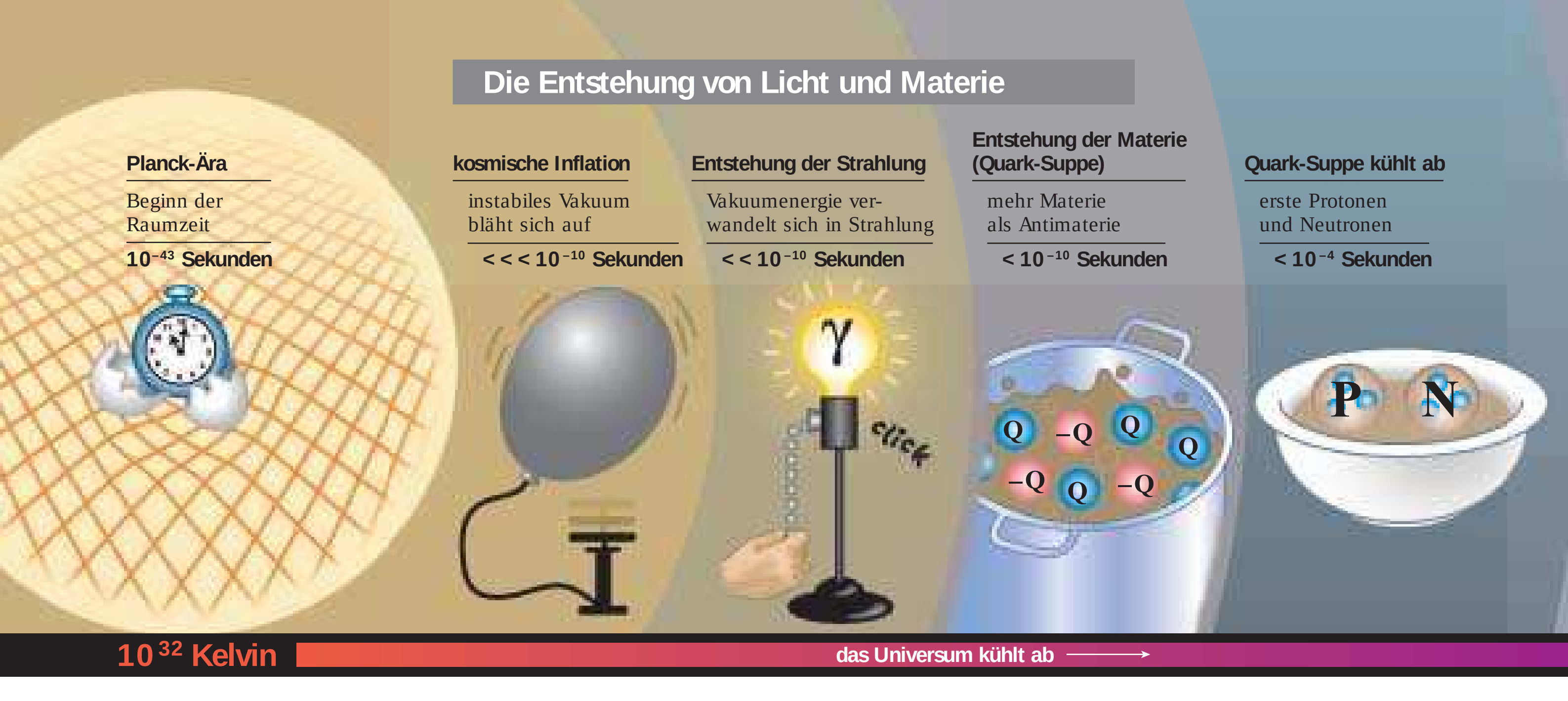
In vielen Schöpfungsmythen steht die Trennung von Licht und Dunkelheit am Beginn des Universums. Die moderne Kosmologie interpretiert die kosmische Hintergrundstrahlung als schwaches Nachleuchten des Urknalls und sucht darin nach Auskunft über den Beginn von Raum und Zeit. Dieses Mosaik aus dem 13. Jahrhundert in der Kuppel der Markuskirche in Venedig zeigt links den Schöpfer, wie er mit erhobener rechter Hand Licht von Dunkel scheidet, und einen Engel, dessen linker Flügel in die Finsternis ragt.

in der kosmischen Hintergrundstrahlung betrachten, erblicken wir die fernsten überhaupt wahrnehmbaren Objekte, die sich am Rand des Universums gigantisch groß über den Himmel erstrecken. Doch zugleich sehen wir dabei das Muster, das dem Kosmos in den ersten Augenblicken seiner Entstehung aufgeprägt wurde – und damals waren diese Strukturen einzelne Quanten, das heißt die kleinsten Gebilde, die in der Natur überhaupt möglich sind.

Obwohl wir uns an die Idee gewöhnt haben, dass im Universum irgendwie alles mit allem zusammenhängt, wirkt eine derart enge Verbindung zwischen Quantenwelt und Kosmos doch sehr überraschend. Das liegt daran, dass uns große Dinge – all das, was man ohne Mikroskop betrachten kann – meist kontinuierlich erscheinen. Wie wir wissen, sind diese Dinge aus winzigen Elementarteilchen zusammengesetzt, aber unsere Anschauung gibt uns darauf keinen Hinweis. Umso bemerkenswerter ist, dass wir, wenn wir die allergrößten Objekte betrachten, gewissermaßen Quanten sehen. Das um uns expandierende Universum wirkt wie ein gigantisches Mikroskop.

Damit nicht genug: Die primordialen Quanten – winzige exotische Fluktuationen im urtümlichen Universum – sind das wichtigste Ordnungsprinzip des Kosmos. Diese zunächst winzigen Quanteneffekte wurden im Laufe der Zeit verstärkt, und zwar zunächst durch die so genannte kosmische Inflation und später durch die Gravitation. Letzten Endes bestimmten die primordialen Quanten, was mit der gesamten Materie geschieht – wo Galaxien entstehen und ob sie groß oder klein werden. Diese Fluktuationen sind außerdem für die Bildung von alledem verantwortlich, was in einer Galaxie vorhanden ist, insbesondere Sterne und Planeten. Die ungeheure Komplexität einer Galaxie ging somit aus einem strukturlosen Elementarteilchen hervor.

So seltsam diese Zusammenhänge auch sein mögen, sie sind unter Kosmologen heute mehr oder weniger akzeptiertes Gemeingut – und Theoretiker denken schon über noch merkwürdigere Möglichkeiten nach. Vielleicht werden wir bald in der Lage sein, die Quanten der Gravitation – die Gravitonen – indirekt zu messen. Sie sind buchstäblich die Elementarteilchen der Raumzeit. Wenn wir tatsächlich ein solches Teilchen beobachten, erfahren wir vielleicht etwas über das Wesen der Zeit und den Grund ihrer Eigenart. Wir könnten Anzeichen für diskrete Zustände dieser Teilchen finden, das heißt eine Art „Pixelung“ oder Körnigkeit des Raum-Zeit-Kontinuums. Im Prinzip könnten wir sogar Daten erhalten, die sich nicht auf Raum und Zeit oder Materie und Energie, wie wir sie kennen, beziehen, sondern auf eine tiefer liegende Struktur, in der diese Begriffe untrennbar vermengt sind. Wenn wir ▶



Die Geschichte des Universums ist geprägt von Expansion, Abkühlung und allmählicher Entwicklung großräumiger Strukturen. Der heutige Mikrowellenhintergrund entspricht einer Schwarzkörperstrahlung von 2,725 Kelvin (Grad über dem absoluten Nullpunkt). Im ersten Monat nach dem Urknall betrug die Temperatur des Alls noch ungefähr fünf Millionen Kelvin. Vermutlich besteht eine enge Verbindung zwischen den Quantenfeldern und -teilchen während der kosmischen Inflation und der heutigen großräumigen Struktur des Universums. Die Forscher hoffen, aus detaillierten Karten der Hintergrundstrahlung Erkenntnisse über die Quantennatur der Gravitation und die Anfänge der Raumzeit zu gewinnen.

jemals so weit kommen, werden wir einen Blick auf den Anfang der Zeit erhaschen und verstehen, wie sie entstanden ist – als Eigenschaft einer fundamentaleren, jedenfalls gequantelten Wesenheit.

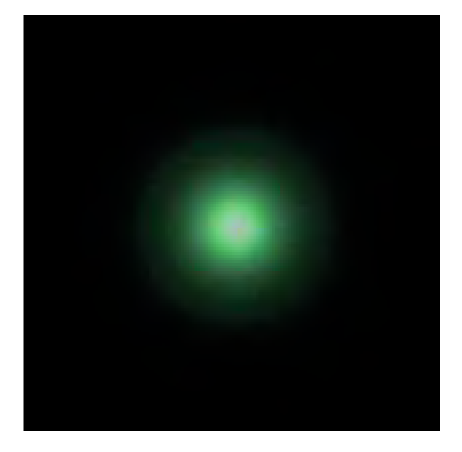
Quantenursprung der kosmologischen Struktur

Betrachten wir das Universum in größtem Maßstab. Neuere Beobachtungen unterstützen ein bemerkenswert einfaches Modell des Kosmos, das auf Einsteins klassischer – das heißt: nicht quantenmechanischer – Theorie von Raum und Zeit beruht. Anscheinend ist der Raum im Großen fast gleichförmig und viel größer als der Teil, den wir sehen können; das schließen wir aus seiner offensichtlich Euklidischen, das heißt flachen Geometrie, die bis zur Beobachtungsgrenze reicht. Dem Standardmodell zufolge dehnt sich der dreidimensionale Raum seit rund 14 Milliarden Jahren gleichmäßig aus – ausgehend von einem viel kleineren, heißeren und dichteren Anfangszustand. Da wir den Vorgang von innen beobachten, können wir nicht sehen, wohinein der Raum sich ausdehnt.

Seit das expandierende Universum älter als ungefähr eine Million Jahre ist, vermag die kosmische Hintergrundstrahlung ungehindert den Raum zu durchqueren. Damals war es viel heißer als heute; seither haben sich der Kosmos und die ihn erfüllende Strahlung durch die Expansion kontinuierlich abgekühlt. Das Spektrum dieser Strahlung bestätigt mit hoher Präzision die Vorhersagen der Urknalltheorie und stammt demnach aus dem ersten Jahr der kosmischen Geschichte. Das urzeitliche Licht hat das physikalisch einfachste Frequenzspektrum – das eines schwarzen Körpers. Die mathematische Formel dafür fand Max Planck vor über einem Jahrhundert und legte damit den Grundstein der Quantenphysik, selbstverständlich ohne noch etwas von Urknall oder kosmischer Hintergrundstrahlung zu ahnen.

Die Strahlung muss schon viel früher vorhanden gewesen sein, denn aus der Theorie geht auch sehr genau die Zusammensetzung der primordialen Materie hervor: ein einfaches Gemisch aus Wasserstoff-, Helium- und Lithiumisotopen, das in den ersten Minuten der Expansion bei Temperaturen von mehr als einer Milliarde Grad erzeugt wurde. Auf Grund all dieser Indizien, die einander gegenseitig stützen, betrachten die meisten Kosmologen den Urknall heute nicht mehr als bloße Hypothese, sondern als festen Bestandteil des kosmologischen Standardmodells.

Um den zentralen Bestandteil dieses Modells – die kosmische Expansion – zu erklären, nimmt man als Ursache ein Energiefeld an, das so genannte Inflaton. Mit passenden Eigenschaften ausgestat-





Die Computergrafiken veranschaulichen Quantenzustände eines Wasserstoffatoms, wobei die unterschiedlichen Farben quantenmechanische Phasen symbolisieren und die Farbintensitäten die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Elektronenpositionen. Die Quantenphysik beschreibt nicht nur die Phänomene auf atomarer und sub-



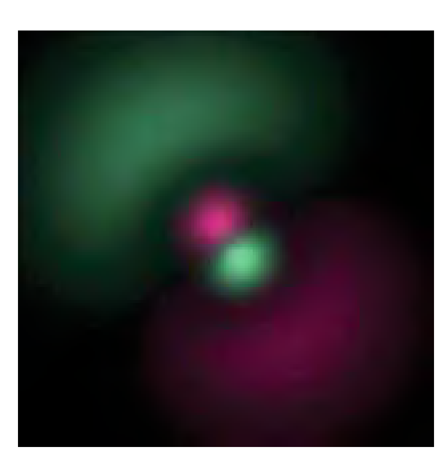
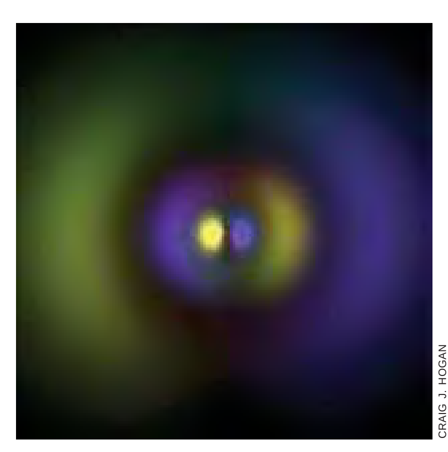
TOM DUNNE

tet ergeben seine Wechselwirkungen eine abstoßende Gravitation und eine Instabilität, welche die ursprüngliche Expansion des Urknalls antreibt, indem sie buchstäblich alles auseinander fliegen lässt. Wie wir vermuten, sorgte die kosmische Inflation dafür, dass das Universum wesentlich größer als ein Atom wurde. Erst die Inflation blähte den Keim des Kosmos auf makroskopische Dimensionen.

Betrachten wir nun das All in mikroskopischen Größenordnungen. Die Grundstruktur von allem, was uns umgibt – Pizzas, Teenager, schlechte Fernsehshows –, wird durch das Verhalten der Atome bestimmt. Die mathematischen Formeln der in den 1920er Jahren entwickelten Quantenmechanik beschreiben Atome mit hoher Genauigkeit. Demnach geben sie Energie nicht kontinuierlich ab, sondern nur in kleinen Portionen, die sich manchmal wie Teilchen und manchmal wie Wellen verhalten. Diese Quanten gehorchen der Heisenberg'schen Unbestimmtheitsrelation: Je genauer wir die Position eines Teilchens kennen – je kleiner sein Wellenpaket ist –, desto unbestimmter muss sein Impuls sein. Nur weil die Elementarteilchen den Quantenregeln gehorchen, bilden sie stabile Atome mit strukturierten Kernen und Elektronenhüllen und verleihen somit der Alltagswelt ihre Regelmäßigkeit und Formenvielfalt. Indem die Quantenmechanik die Bausteine der Natur beschreibt, dient sie den Forschern seit achtzig Jahren als Grundlage von Physik, Chemie und Biologie. Sie erklärt alles, was auf der mikroskopischen Ebene der Elementarteilchen geschieht. Licht besteht aus Photonen. Atome bestehen aus Quarks, Gluonen und Elektronen. Moleküle bestehen aus Atomen. Und Pizzas bestehen aus Molekülen.

Indem die Inflation kleine Dinge groß macht, weist sie der Quantenphysik eine neue und unerwartete Aufgabe zu: Die Physik des Allerkleinsten prägt das Verhalten des Kosmos im Großen und Ganzen. Auf Grund von Quanteneffekten hat die Inflation im gegenwärtigen Universum eine subtile Spur hinterlassen. Das Inflatonfeld war nicht völlig glatt, sondern enthielt Störungen oder Fluktuationen. Die Energie, die den Kosmos erschuf, war wie alle Energiefelder ein Quantenfeld. Sie bestand aus diskreten Energiepaketen, den Inflatonen – so wie Licht aus einzelnen („diskreten") Photonen besteht oder das Atom aus einzelnen Elementarteilchen. Quantenfelder sind niemals völlig in Ruhe; selbst das perfekteste Vakuum wimmelt von Fluktuationen virtueller Teilchen, die spontan entstehen und sofort wieder verschwinden. Ihre durchaus realen physikalischen Effekte können in Laborexperimenten, die beispielsweise auf virtuelle Photonen ansprechen, zweifelsfrei nachgewiesen werden. Aus diesem Grund konnte das primordiale Inflatonfeld niemals absolut glatt und gleichmäßig über den Raum verteilt sein. Das bedeutet, dass die primordiale Expansion an manchen Orten ein bisschen stärker angetrieben wurde als an anderen. Der Effekt eines einzelnen Inflatonquants wurde – im selben Maße wie das Universum selbst – enorm vergrößert, und dieses Inflaton hinterließ die Spur seiner Wirkung auf einen riesigen Raumbereich.

Die Inflaton-Fluktuationen sind der Grund dafür, dass sich das Universum schließlich in Galaxien, Sterne und Planeten aufteilte. Die Fluktuationen wurden gleichsam in die Raumstruktur eingefroren und in etwas dichter und dünner mit Materie erfüllte Regionen umgewandelt. Die dichteren Bereiche kollabierten schließlich infolge ihrer eigenen Schwerkraft. Ohne diese Störungen wäre das ▶

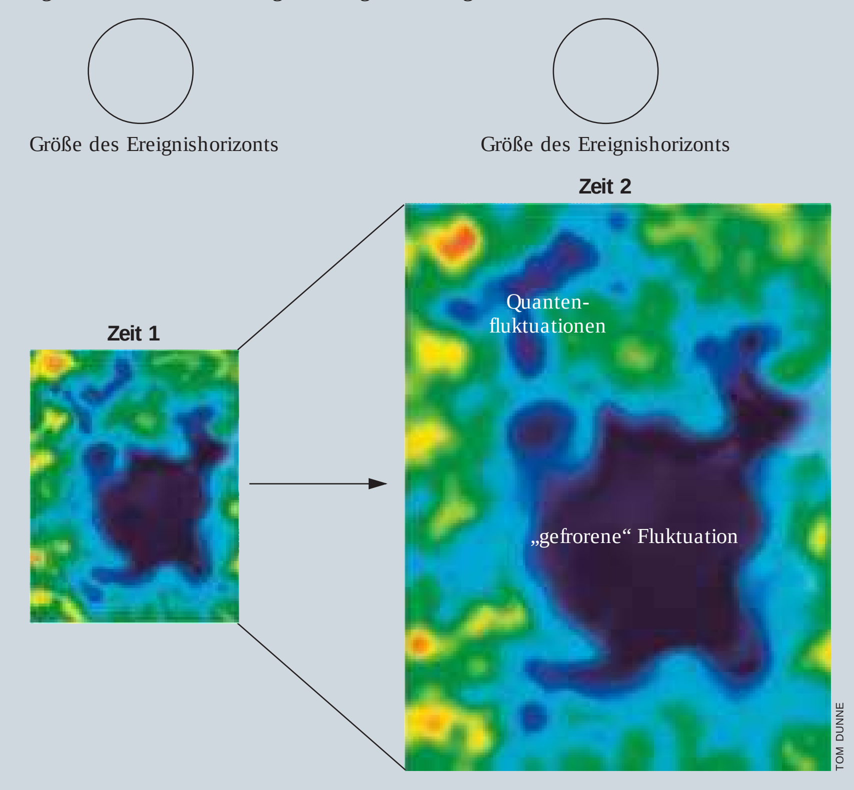



CRAIG J. HOGAN

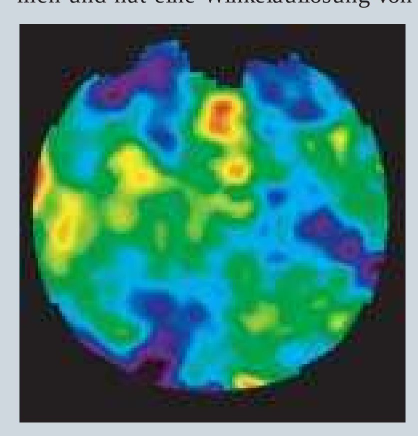
atomarer Ebene, sondern spielt auch eine wichtige Rolle für die Kosmologie. Quantenfluktuationen in der Frühgeschichte des Universums erzeugten die Anisotropie der kosmischen Hintergrundstrahlung und legten schließlich fest, wo Galaxien entstanden und wie groß sie wurden.

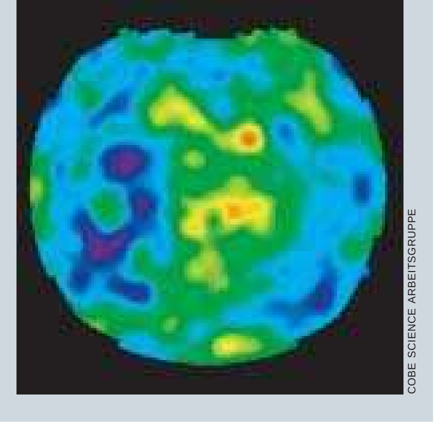
Aus Quantensprüngen werden kosmische Strukturen

Durch die kosmische Inflation wurden Materie und Felder rapide auf enorme Größe gedehnt, doch das in jedem Moment kausal verbundene Gebiet – der „Ereignishorizont" während der Inflation – blieb ungefähr gleich: viel kleiner als ein Atom. Quantenfluktuationen, die kleiner waren als der Ereignishorizont, wurden von der Inflation nicht erfasst und verschwanden rasch wieder. Doch größere Fluktuationen wurden von der Inflation mitgerissen und in das rasch wachsende Gewebe der Raumzeit eingefroren. Schließlich erreichten sie gewaltige Ausmaße und erzeugten die großräumigen Strukturen, die wir heute sehen.



Der Satellit Cobe (Cosmic Background Explorer) entdeckte winzige Temperaturabweichungen der kosmischen Hintergrundstrahlung in der nördlichen (links) und südlichen galaktischen Hemisphäre. Die wärmsten (rot) und kühlsten (violett) Flecken entsprechen einem zehntel Kelvin über und unter dem Mittelwert von 2,725 Kelvin. Jeder Fleck erstreckt sich über Milliarden Lichtjahre am Rand des sichtbaren Universums; selbst die kleinsten Flecken könnten ohne weiteres die größten bisher beobachteten Strukturen umspannen – kosmische „Wände", die tausende Galaxien enthalten und hunderte Millionen Lichtjahre groß sind. Diese Cobe-Karte fasst die Daten von vier Jahren zusammen und hat eine Winkelauflösung von rund sieben Grad.





COBE SCIENCE ARBEITSGRUPPE

Universum heutzutage noch immer völlig gleichförmig. Jede Galaxie und jeder Galaxienhaufen, die wir sehen, stammen letztlich von einem oder einigen wenigen elementaren Inflatonpartikeln im frühen Universum ab.

Demnach besagt die gegenwärtige Standardtheorie, dass unsere gesamte Galaxis mehr oder weniger mit einem einzigen elementaren Teilchen begann, das viel kleiner als ein Atom war. Ich hielt dies zunächst für einen absurden Gedanken, habe mich aber durch Beobachtungsdaten von hoher Qualität umstimmen lassen.

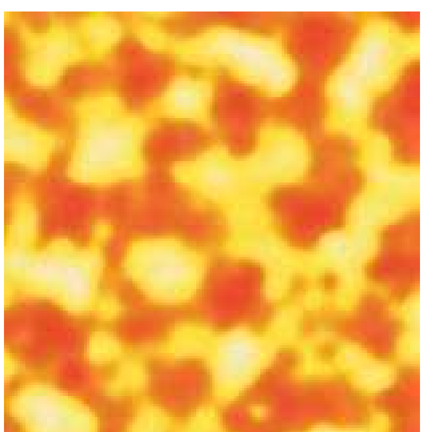
Bilder von primordialen Quanten

Die überzeugendsten Indizien bieten die Himmelskarten der primordialen Strahlung. Der kosmische Strahlungshintergrund erscheint fast – aber nicht völlig – isotrop, das heißt in allen Richtungen gleichförmig; seine Schwarzkörpertemperatur beträgt 2,725 Kelvin (Grad über dem absoluten Nullpunkt). Die Gravitationseffekte der Inflatonstörungen erzeugten nicht nur materielle Gebilde wie Galaxien, sondern auch Muster von etwas wärmeren und kälteren Strahlungsflecken am Himmel. Diese Temperaturdifferenzen sind extrem gering – im Bereich von einem zehntausendstel Grad –, aber das Muster bewahrt offenbar primordiale Information auf und stimmt im Rahmen der heutigen experimentellen Genauigkeit sehr gut mit den theoretischen Vorhersagen überein.

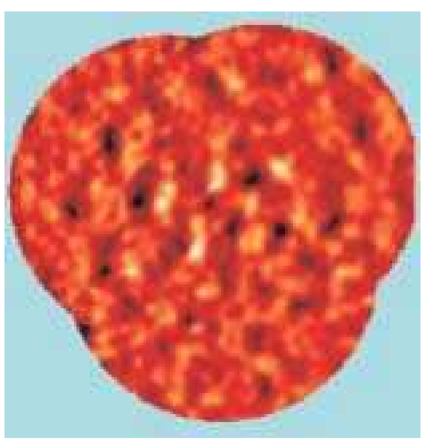
Vor ungefähr zehn Jahren machte der Satellit Cobe (Cosmic Background Explorer) die ersten Beobachtungen solch urtümlicher Strukturen. Diese berühmte Kartierung erfasste den gesamten Himmel, war aber ziemlich verrauscht und – mit einer Auflösung von rund sieben Grad – recht verschwommen. In den vergangenen zwei Jahren haben Experimente an exotischen Orten – auf Stratosphärenballons über der Antarktis und auf hochgelegenen Wüstenpässen der Anden – wesentlich rauschfreiere und höher aufgelöste Karten kleinerer Himmelsausschnitte geliefert. Derzeit sammelt der Nasa-Satellit Map (Microwave Anisotropy Probe) Daten für eine hochaufgelöste Karte des gesamten Himmels.

Bis Ende nächsten Jahres dürfte Map nicht nur die Temperaturfluktuationen äußerst detailliert gemessen haben, sondern auch die Polarisation der Strahlung. Ähnlich wie Sonnenlicht durch Reflexion polarisiert wird – die reflektierten Lichtwellen schwingen parallel zur Spiegelfläche –, so wurden die Photonen des Mikrowellenhintergrunds durch ihre Begegnung mit freien Elektronen im frühen Universum polarisiert. In einigen Jahren soll eine europäische Mission, der ▶

MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON CBI / CALTECH / NSF



Hochaufgelöste Bilder des kosmischen Mikrowellenhintergrunds enthüllen in kleinen Himmelsausschnitten feine Temperaturvariationen. Der Cosmic Background Imager (oben) steht in einer chilenischen Wüstenregion und misst in einem Himmelsgebiet, das sich über rund zwei Grad erstreckt, Temperaturabweichungen mit einer Auflösung von sieben Bogenminuten (links; wärmer: weiß, kälter: rot). Das Very Small Array (unten) steht in den Bergen der kanarischen Insel Teneriffa und erfasst ein rund acht Grad großes Himmelsgebiet mit einer Auflösung von zwanzig Bogenminuten (rechts). Die neuen Bilder – beide stammen von Mai 2002 – stützen die Theorie der kosmischen Inflation.

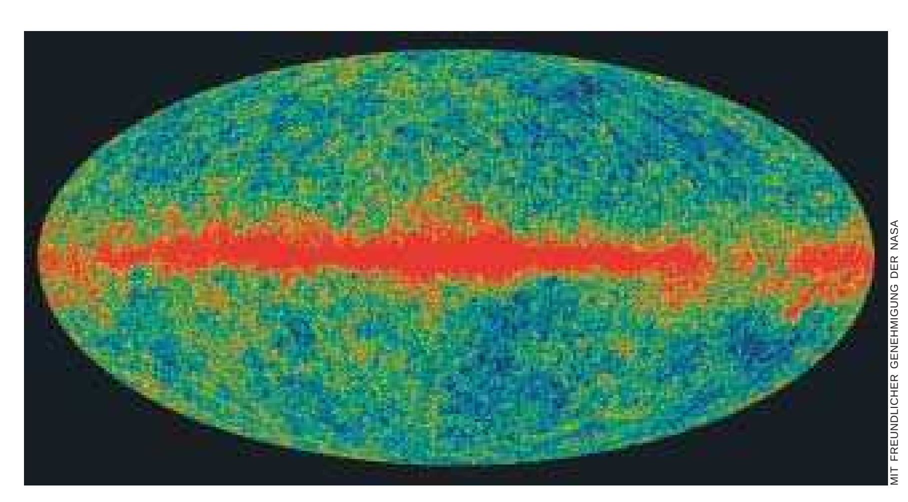




MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON VSA COLLABORATION

Planck Surveyor, eine noch detailliertere und genauere Karte liefern.

Die neuen Karten haben so hohe Auflösung – weit unter einem Grad –, dass sie offenbaren, ob das Universum auf Grund der kleinen primordialen Störungen wie ein Trommelfell oder wie eine Wasseroberfläche schwingt. Die Präzision der Daten erlaubt die Messung vieler kosmologischer Parameter, etwa der Materiedichte und der globalen Raumkrümmung, bis auf wenige Prozent genau. Wir besitzen nun sogar präzise Daten über einige Parameter des Inflatonfelds; diese neue Naturkraft ist auf andere Weise bisher nicht zu beobachten.



MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG DER NASA



MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON NASA UND MAP SCIENCE TEAM

Eine Simulation der Himmelskarte (oben), welche die Microwave Anisotropy Probe Map (unten) im kommenden Jahr fertig stellen soll, zeigt viel feinere Details als Cobe. Die Map-Bilder werden eine Auflösung von mindestens 18 Bogenminuten haben; die ersten Daten sollen im Januar 2003 vorliegen. Spätere Sonden werden vielleicht Spuren von Gravitonen entdecken, den Quanten der Raumzeit.

Außer den Inflatonstörungen entstehen während der Inflation auch Quanten des Gravitationsfelds. Sie haben vermutlich in Form von großen Gravitationswellen ebenfalls Spuren in der Raumzeit hinterlassen und dadurch zur Anisotropie der Hintergrundstrahlung beigetragen. Zwar wurden bis heute Gravitationswellen noch nicht direkt beobachtet, doch Einsteins Theorie der Raumzeit sagt diese Form von Energie vorher. Wenn demnächst die neuen Laserinterferometer wie Ligo in Betrieb gehen, werden sie zwar wahrscheinlich erstmals Gravitationswellen nachweisen, allerdings bei viel höheren Frequenzen, die nicht von der Inflation stammen. Wie die Inflatonquanten wurden auch einzelne Gravitonen durch die Inflation riesig aufgebläht. Um die Inflaton- von den Graviton-Fluktuationen zu unterscheiden, sucht man in den von Map und anderen Beobachtungskampagnen gelieferten Daten nach Polarisationsmustern, die nur von Gravitonen herrühren können (siehe „Der Nachhall des Urknalls“ von R. Caldwell und M. Kamionkowski, Spektrum der Wissenschaft 04/2001, S. 50).

Das holografische Prinzip

In der Theorie der kosmischen Inflation wird die Raumzeit selbst nicht quantenmechanisch beschrieben, sondern gemäß der klassischen Einstein’schen Darstellung als glattes Kontinuum; die Quantenfelder werden nachträglich als schwache Störungen eingeführt. Doch das kann nur eine grobe Näherung sein. Genau genommen müssen Quantensprünge in der Struktur von Raum und Zeit selbst berücksichtigt werden. Vielleicht enthält das Muster am Himmel den entscheidenden Hinweis, wie das gehen kann.

Betrachten wir die Information, die in einem solchen Muster steckt. Der Informationsgehalt entspricht ungefähr der Größe der Computerdatei, in der das Muster – beispielsweise ein Bild oder ein Klang – gespeichert werden kann. In der Standardtheorie der Inflation enthält das Muster am Himmel eine unendlich große Informationsmenge, da die Helligkeitsschwankungen als kontinuierliches Rauschen behandelt werden. Aber in einer echten Quantenkosmologie könnte die Informationsmenge endlich sein. Wenn der Informationsgehalt während der Inflation nicht allzu groß war, könnte er sogar kleiner sein als der unserer heutigen Strahlungskarten; in diesem Fall würden die Karten Anzeichen für diskrete Quantenzustände enthalten.

Moderne Modems sind bei der Informationsübertragung so schnell, dass sich die Übertragung wie zufälliges Rauschen

anhört. Mit älteren, langsameren Modems konnte man die Tonfolge hören und erkannte sofort, dass die diskreten Signale einen bestimmten endlichen Informationsbetrag transportieren.

Auch wenn man ein digitales Bild oder ein altes Mosaik von nahem betrachtet, sieht man, dass es in diskrete Elemente zerfällt. Jedes Pixel oder jeder Mosaikstein hat eine einheitliche Farbe und wurde aus einem begrenzten Inventar ausgewählt. Wir nehmen an, dass die Raumzeit selbst letztlich eine ähnliche Struktur aufweist, auch wenn wir sie noch nicht entdeckt haben. Vielleicht erscheint sie erstmals in der Großaufnahme einzelner Quanten, die uns die Inflation liefert.

Tiefe Einsichten in die Verbindung von Quantenphysik und Raumzeit ergeben sich aus der Betrachtung des Informationsflusses in Schwarzen Löchern (siehe „Das Informationsparadoxon bei Schwarzen Löchern“ von L. Susskind, Spektrum der Wissenschaft 06/1997, S. 58). Ein Schwarzes Loch besteht praktisch nur aus stark gekrümmter Raumzeit. Innerhalb des Ereignishorizonts, einer ungefähr kugelförmigen Fläche im Raum, deren Größe von der Masse des Lochs abhängt, ist die Gravitation, das heißt die Krümmung der Raumzeit, so stark, dass nicht einmal Licht zu entkommen vermag – es sei denn auf Grund seiner Quantennatur. Da ein Quant stets eine gewisse räumliche Ausdehnung hat, ist es mit einiger Wahrscheinlichkeit noch weit genug vom Loch entfernt, um dessen Gravitation zu entfliehen. Darum strahlt sogar ein Schwarzes Loch ein wenig Energie ab und wandelt dabei pure Raumzeit-Energie – Gravitation – in andere Energieformen um, insbesondere in Strahlung.

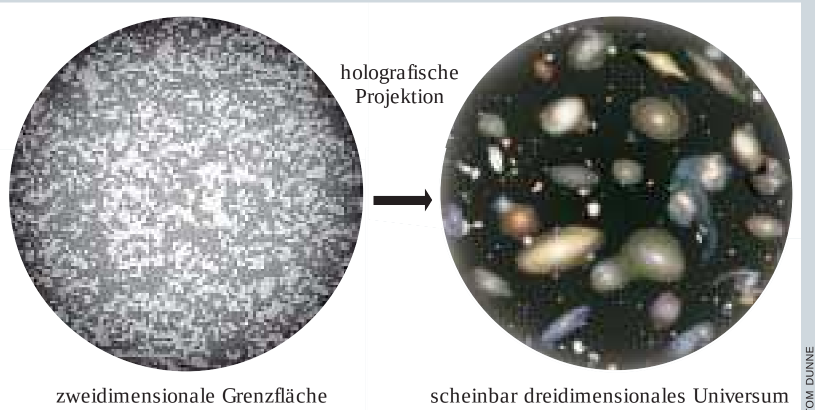
Die Theorie der Verdampfung Schwarzer Löcher wurde von Stephen Hawking, Jacob Bekenstein und anderen entwickelt; sie sagt aus, wie viele Teilchen ein Schwarzes Loch emittiert und welche Energie sie haben. Wie sich zeigt, gehorcht die maximale Informationsmenge, die all das beschreibt, was in ein Schwarzes Loch fällt, einer sehr einfachen Formel: Sie beträgt ein Viertel der Fläche A des Ereignishorizonts in Planck-Einheiten, wobei die Gravitationskonstante G, das Planck'sche Wirkungsquantum h und die Lichtgeschwindigkeit c gleich 1 gesetzt werden. Somit lässt sich der Zustand eines Schwarzen Lochs – alles was man darüber wissen kann, das Ergebnis jedes denkbaren Experiments – durch eine Zahl ausdrücken, die aus $n = A/4 \ln 2$ binären Ziffern besteht. (Der natürliche Logarithmus von 2 steht hier, weil wir die Information in Bits und nicht in Einheiten der Entropie angeben.)

Wir können uns die Raumzeit selbst als aktives Quantenobjekt vorstellen. In diesem Bild verwandelt die Hawking-strahlung Quanten der Raumzeit – Gravitonen – in Quanten anderer Energieformen, wobei die Information erhalten bleibt. Das Schöne daran ist, dass wir den Zusammenhang zwischen Gravitation und Information zahlenmäßig ausdrücken können und eine quantitative Abschätzung für die Quantisierung der Raumzeit gewinnen.

Aus solchen Argumenten haben Gerard 't Hooft von der Universität Ut- ▶

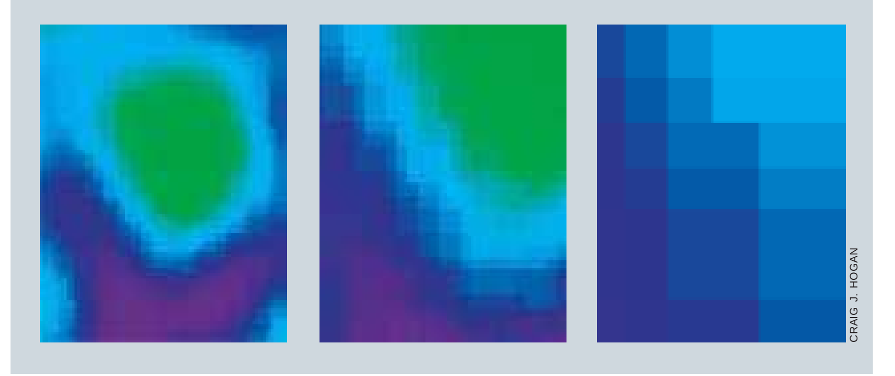
Das All als Quanten-Mosaik

Das holografische Prinzip besagt, dass das Universum eigentlich eine zweidimensionale Fläche ist (links) und nur scheinbar die drei Raumdimensionen besitzt, die wir wahrnehmen (rechts). Das Hologramm des Universums besteht möglicherweise aus nur endlich vielen Teilen – entfernt vergleichbar den Steinen eines Mosaiks – und enthält darum in Wirklichkeit eine wesentlich geringere Informationsmenge als bisher angenommen. Das holografische Prinzip schränkt den Spielraum der Möglichkeiten, die während der kosmischen Inflation zur Verfügung standen, drastisch ein. Indizien dafür sollten in der Anisotropie des kosmischen Hintergrunds zu finden sein.



TOM DUNNE

Die holografische Quantisierung der Raumzeit lässt sich mit der Pixelstruktur eines Computerbildschirms vergleichen (unten). Dem holografischen Prinzip zufolge begann das All mit sehr wenig Information. Tatsächlich könnte der Gesamtbetrag der in einem primordialen Quant enthaltenen Information etwa der Datenmenge vergleichbar gewesen sein, die auf einem üblichen Computerbildschirm dargestellt wird: rund eine Million diskrete Bildelemente. Zwar werden die diskreten „Pixel“ der Quantengravitation gewiss wenig Ähnlichkeit mit der quadratischen Parkettierung eines Bildschirms oder eines byzantinischen Mosaiks aufweisen, aber sie sind vermutlich ebenso deutlich unterscheidbar wie die Quantenzustände eines Atoms. Das körnige Bild des kosmischen Mikrowellenhintergrunds könnte letztlich einen Blick auf die Quantenstruktur ermöglichen, aus der Raum und Zeit hervorgingen.



CRAIG J. HOGAN

recht und Leonard Susskind von der Stanford University gefolgert, dass die Physik einem „holografischen Prinzip“ gehorchen muss: Der gesamte Zustand der Objekte in einem beliebigen dreidimensionalen Volumen kann durch eine endliche Informationsmenge charakterisiert werden, die kleiner ist als ein Viertel der zweidimensionalen Oberfläche dieses Volumens. Die beiden Forscher mutmaßen, dass die Welt einem Hologramm gleicht. Ein übliches optisches Hologramm wird erzeugt, indem man ein Objekt mit zwei gekreuzten Laserstrahlen beleuchtet und das Interferenzmuster auf einen zweidimensionalen Film bannt. Bei späterem Bestrahlen des entwickelten Films mit einem Laser wird die ursprüngliche Information rekonstruiert und ein dreidimensionales Abbild des Objekts projiziert.



Wie ’t Hooft und Susskind meinen, erscheint uns das Universum zwar dreidimensional, ereignet sich aber „in Wirklichkeit“ auf einer zweidimensionalen Projektionsfläche. Außerdem ist diese Fläche nicht kontinuierlich, sondern körnig: Das Hologramm besteht aus diskreten Stücken, ähnlich wie ein Mosaik. Darum gibt es viel weniger Information, als man bei separater Betrachtung von Quantenmechanik und Gravitation erwarten würde.

Auch inflationäre Universen haben Ereignishorizonte, die allerdings eher der Innenansicht der Ereignishorizonte von Schwarzen Löchern gleichen. Wiederum gilt: Die maximal beobachtbare Information ist ein Viertel der Fläche des Ereignishorizonts. Das bedeutet, dass die Vielfalt der während der Inflation möglichen Ereignisse viel kleiner ist, als sie bei einer Raumzeit wäre, die sich nicht quantenmechanisch verhält. Insbesondere bedeutet die holografische Einschränkung, dass das Inflatonfeld nur sehr eng begrenzte Möglichkeiten hat zu fluktuieren. Falls sich diese Einschränkung beobachten ließe, würde die Anisotropie der kosmischen Hintergrundstrahlung erstmals direkte Information über die Auswirkungen der Quantengravitation liefern – und vielleicht darüber, ob die Stringtheorie zutrifft oder noch fundamentalere Ideen erforderlich sind.

Heiliger Gral – fast leer?

Die Quantenregeln, die für das Wasserstoffatom gelten, sind sehr einfach und schlüssig, aber ohne detaillierte Daten über viel kompliziertere Atomspektren wären sie nie erraten worden. Vielleicht können wir auf ähnliche Weise aus der Anisotropie des Mikrowellenhintergrunds die Quantennatur der Raumzeit erschließen.

Obwohl die Himmelskarten eine gewaltige Datenmenge enthalten – und die kommenden Ergebnisse versprechen noch mehr davon –, bergen sie vielleicht letzten Endes sehr wenig Information. Einfache Modelle der holografischen Inflation besagen, dass der gesamte Informationsbetrag, der den Quanten des Strahlungshintergrunds zur Verfügung steht, relativ bescheiden ist – das Äquivalent von weniger als einer Million Pixel oder ungefähr die Informationsmenge, die ein gewöhnlicher Computerbildschirm wiedergibt. Das ist viel weniger, als unsere künftigen Strahlungskarten wiedergeben werden; darum werden wir darauf vielleicht diese kosmische Informationsgrenze sehen können.

In diesem Fall wäre die Körnung des Bildes – oder ein anderes, komplizierteres Quantenmuster – ein direktes Zeichen für die holografische Quantisierung der Raumzeit. Wir könnten dies mit Fug und Recht einen Blick auf den Ursprung der Zeit nennen, denn wir würden durch die „gewöhnliche“ Zeit hindurch zu einer fundamentaleren diskreten Struktur vordringen, aus der unsere scheinbar kontinuierliche Raumzeit hervorgegangen ist.

Doch vermutlich wäre diese Enthüllung gar nicht besonders aufschlussreich. Wir sollten uns die primordiale Quantisierung nicht als Heiligen Gral vorstellen, der die Lösung sämtlicher Rätsel der Schöpfung verspricht. Wenn man Informationsgehalt mit interessantem Inhalt gleichsetzt, dann ist der Anfang der Zeit viel weniger interessant als alles, was später geschah. Alle Indizien sprechen dafür, dass das Universum zu Beginn kaum Information enthielt und alle komplexen Strukturen sich seitdem von selbst – ohne äußere Einflüsse – entwickelt haben. Wenn das zutrifft, werden uns der Anfang der Zeit und seine detaillierte Struktur wenig dabei helfen, all die interessanten Dinge zu verstehen, die seitdem im Universum geschehen sind. ■

Literaturhinweise

Das kleine Buch vom Big Bang. Eine Kosmos-Fibel. Von Craig J. Hogan. Deutscher Taschenbuch Verlag, München 2000.

A Flat Universe from High-Resolution Maps of the Cosmic Microwave Background Radiation. Von P. de Bernardis et al. in: Nature, Bd. 404, S. 955 (2000).

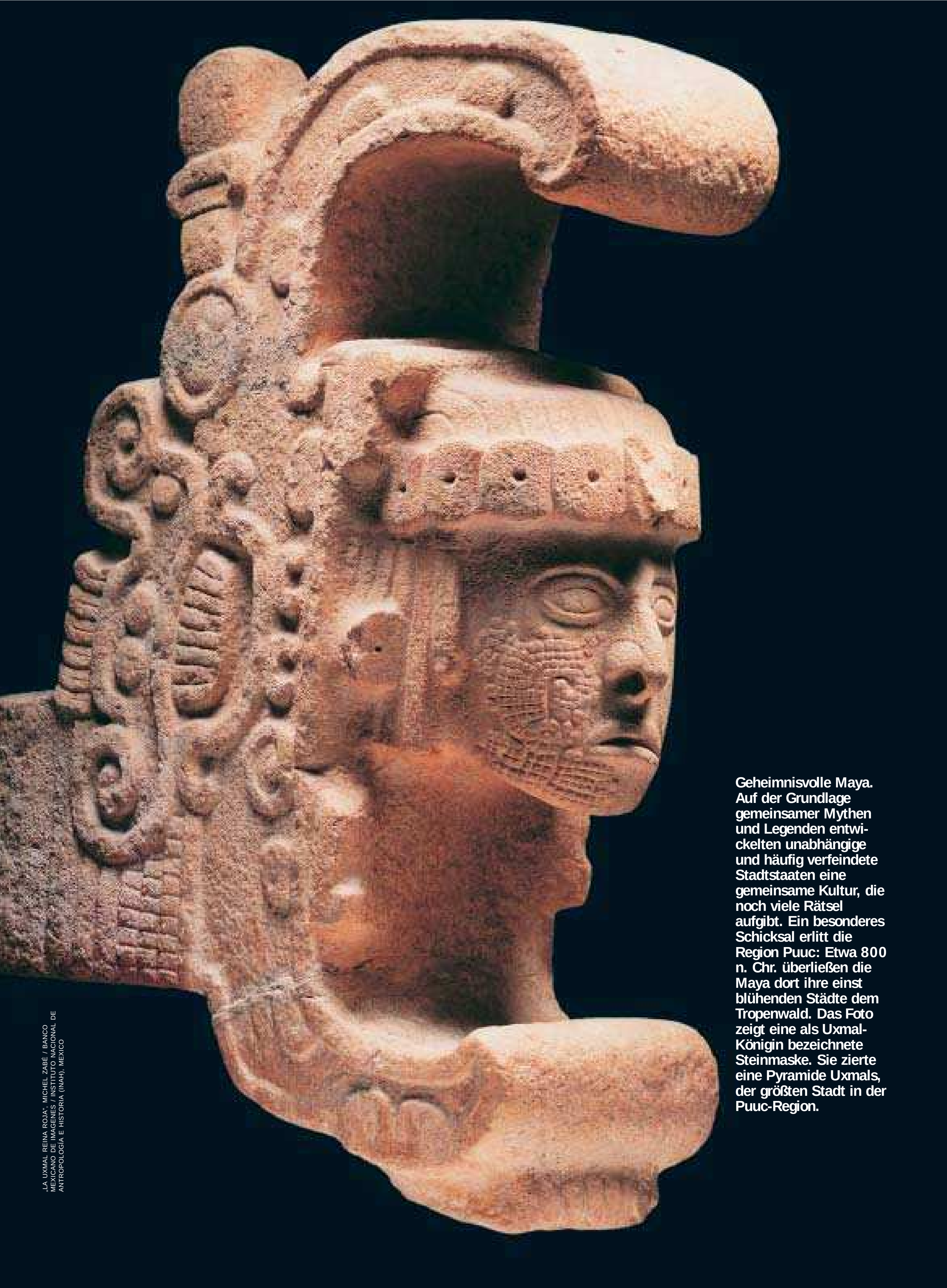
Vor dem Anfang. Eine Geschichte des Universums. Von Martin Rees. Fischer, Frankfurt 1998.

Elementarteilchen und inflationärer Kosmos. Von Andrei Linde. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1993.

Weblinks zum Thema bei ***www.spektrum.de*** *unter „Inhaltsverzeichnis“*



Craig J. Hogan *ist Professor für Astronomie und Physik an der University of Washington in Seattle. Er hat viele Aspekte der Kosmologie erforscht, insbesondere die Hintergrundstrahlung, die primordiale Häufigkeit der leichten Elemente und die kürzlich entdeckte Dunkle Energie, die für die beschleunigte Expansion des Weltalls verantwortlich ist. Zurzeit untersucht er, ob durch die Messung des primordialen Gravitationswellenhintergrunds eine neue Physik entstehen wird.*



Geheimnisvolle Maya. Auf der Grundlage gemeinsamer Mythen und Legenden entwickelten unabhängige und häufig verfeindete Stadtstaaten eine gemeinsame Kultur, die noch viele Rätsel aufgibt. Ein besonderes Schicksal erlitt die Region Puuc: Etwa 800 n. Chr. überließen die Maya dort ihre einst blühenden Städte dem Tropenwald. Das Foto zeigt eine als Uxmal-Königin bezeichnete Steinmaske. Sie zierte eine Pyramide Uxmals, der größten Stadt in der Puuc-Region.

MAYA-ARCHÄOLOGIE

Der Untergang von Xkipché

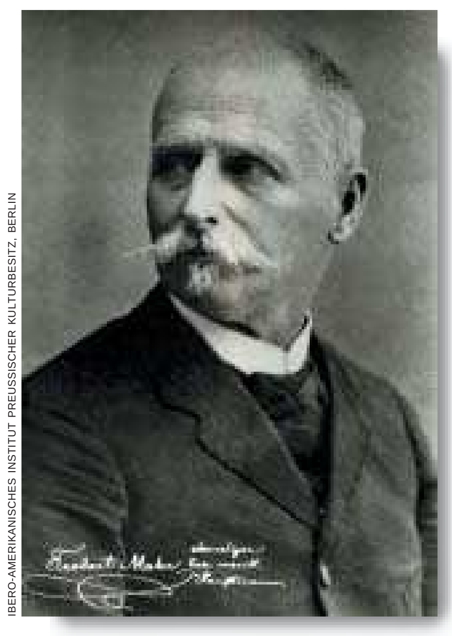
Abrupt endete die Hochkultur der Maya im Tiefland Yukatans. Krieg oder Klimawandel? Noch heute rätseln Archäologen, warum blühende Städte plötzlich verfielen.

Von Michael Vallo und Iken Paap

Sechs Uhr in der Frühe. Wir klammern uns müde an die Sitze auf dem alten Pritschenwagen. Schon jetzt zeigt das Quecksilber 25 Grad an, es verspricht wieder ein heißer Tag zu werden – typisch für den April in Mexiko. Gemeinsam mit unseren Kollegen von der Universität Bonn und Archäologen des „Instituto Nacional de Antropología e Historia Yucatán“ sowie fast dreißig Arbeitern schaukeln wir auf Wegen, die diesen Namen kaum verdienen. Unser Ziel: die Ruinen von Xkipché, einer wenig bekannten Maya-Siedlung im Nordwesten der Halbinsel Yukatan.

Eine Stunde später haben wir unseren Arbeitsplatz im Buschwald erreicht. Während zehn Kilometer nördlich Bildungsreisende die Ruinen von Uxmal bewundern und noch einmal hundert Kilometer weiter im Norden Touristen an weißen Stränden ins Meer springen, schleppt unser kleiner Trupp Hacken und Schaufeln in die Savanne. Wir passieren eine sechs Meter hohe Plattform aus Erde und Steinen, darauf stehen die Überreste eines monumentalen zweistöckigen Gebäudes der Maya.

Der deutsche Archäologe Teobert Maler (1842–1917) hatte diesen Palast schon gegen Ende des 19. Jahrhunderts fotografiert, Jahre nachdem er mit dem erfolglosen Expeditionsheer des mexikanischen Kaisers Maximilian in Veracruz an Land gegangen war (siehe Kasten Seite 42). Doch seine Beschreibungen, Zeichnungen und Fotografien gerieten in Vergessenheit, bis der Archäologe Hanns J. Prem sich des umfangreichen Nachlasses von Maler im Ibero-Amerikanischen Institut in Berlin annahm. Der Leiter des Instituts für Altamerikanistik und Ethnologie der Universität Bonn bereitete das Material auf, 1997 wurde es zum ersten Mal veröffentlicht. Einige der abgebildeten Stätten versuchte Prem wieder zu finden. So entdeckte er 1989 gemeinsam mit dem amerikanischen Archäologen George F. Andrews von der Universität Oregon erneut die Ruinenstadt von Xkipché, die südlich von Uxmal liegt.


IBERO-AMERIKANISCHES INSTITUT PREUSSISCHER KULTURBESITZ, BERLIN

Der Forschungsreisende und Fotograf Teobert Maler erkundete Ende des 19. Jahrhunderts die Maya-Stätten auf der Halbinsel Yukatan.

Seit 1991 forscht sein Team dort nach Hinweisen auf eines der großen Rätsel der Archäologie Altamerikas: den Untergang der Maya-Städte im nördlichen Tiefland der Halbinsel Yukatan.

Mittlerweile gehört diese Halbinsel zu Mexiko, Guatemala und Belize. Dort sowie in angrenzenden Bereichen des heutigen Honduras existierten zwischen 500 v. Chr. und der Eroberung durch die Spanier im 16. Jahrhundert die Stadtstaaten und Stadtbünde der Maya. Was davon übrig geblieben ist, dient jetzt als Touristenattraktion. Zu den Pyramiden von Chichen Itza pilgern alljährlich mehr als eine Million Reisende aus aller Herren Länder.

Ihre Anfänge nahm die Kultur der Maya spätestens um 1500 v. Chr. im Süden und Südwesten der Halbinsel. In der als klassisch bezeichneten Periode von 300 bis 900 n. Chr. entwickelten sich viele kleine Dörfer zu mächtigen Stadtstaaten, von Gottkönigen regiert. Spätestens um 850 bis 900 n. Chr. aber muss etwas Schreckliches geschehen sein, denn die meisten Metropolen und Siedlungen im Tiefland wurden in kurzer Zeit weitgehend verlassen und verfielen.

Warum endete diese Periode der steten Entwicklung so abrupt? Haben Kriege, Epidemien, Natur- oder Umweltkatastrophen die Menschen vertrieben? Neue Fakten ans Licht zu bringen ist das Ziel des „Archäologischen Projekts Xkipché“. Denn die Puuc-Region, ein subtropisches und tropisches Tiefland-Gebiet von der Größe des Saarlandes, lässt sich ohne Übertreibung mit Mesopotamien oder dem Alten Ägypten vergleichen. ▶



INSTITUT FÜR ALTAMERIKANISTIK UND ETHNOLOGIE, UNIVERSITÄT BONN

Die Nordzone des Siedlungsgebiets der Maya umfasste den größten Teil der Halbinsel Yukatan, darin auch die Städte des so genannten Puuc-Stils: Uxmal, Kabah, Labna und Chichen Itza. Das als Peten bezeichnete Tiefland und der heutige Staat Belize gehören zur Zentralzone des Maya-Gebietes. Dort ist die Maya-Kultur entstanden, Tikal und Uaxactun gehören zu den ältesten Städten. Das Bergland Südguatemalas machte die Südzone aus. Seine Vulkanketten säumen den Pazifik (rote Dreiecke kennzeichnen die wichtigsten Fundstätten).

Auch dort entwickelten sich in nur wenigen hundert Jahren große Städte. In der klassischen Zeit existierten im Puuc-Gebiet 250 kleinere und größere Siedlungen, darunter auch so bekannte Städte wie Uxmal, Sayil und Kabah.

Die Baumeister der Region entwickelten sogar einen eigenständigen Architekturstil: Hatten ihre Gebäude um etwa 450 n. Chr. noch Wände aus grob bearbeiteten Steinquadern, ersannen sie im Laufe von 200 Jahren eine völlig andere Konstruktionstechnik und verblendeten einen Kern aus Mörteln und groben Bruchsteinen mit fein bearbeiteten Steinen. Die Decken bauten sie in der frühen Zeit als Kraggewölbe, also durch Aufeinandersetzen immer weiter nach innen vorstehender Quader. Ihre tragende Funktion übernahm später ein solider Kern aus einer Art Zement, vermischt mit Bruchsteinen. Mittels Zapfen und Mörtel verankerten die Maurer Blendsteine als Verkleidung in der Gewölbekonstruktion. Auch für das Auge wurde etwas getan: Waren die Fassaden zunächst schmucklos und lediglich durch einfache Gesimsbänder zweigeteilt, zierten später Säulen den oberen Fassadenteil. Eine außen weiße und innen wohl weiße bis orangefarbige Putzschicht verschönte die Gebäude zu allen Zeiten.

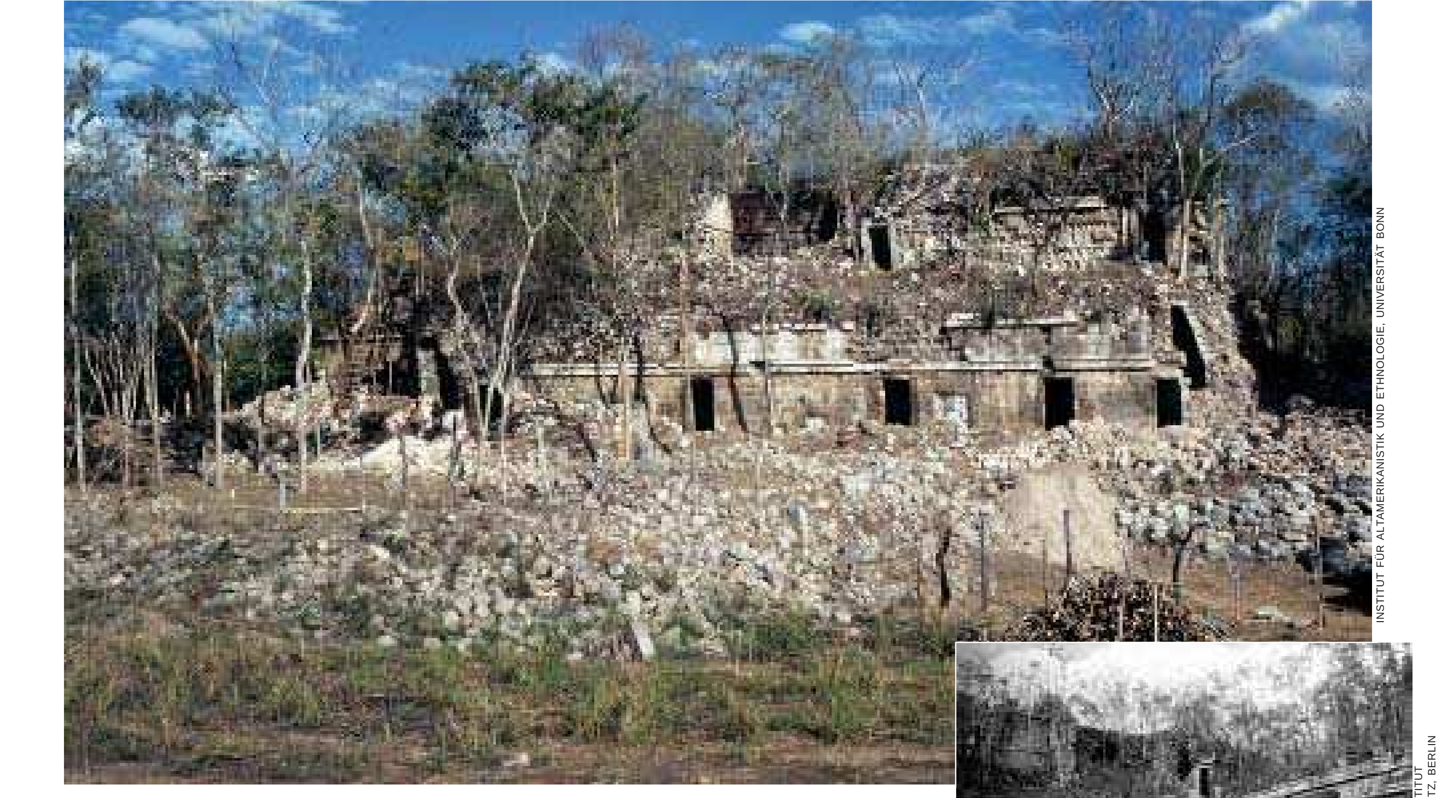
Die bauliche Entwicklung dürfte einem schlichten Zweck gedient haben: Sie reduzierte den nötigen Aufwand für die Bearbeitung der vermauerten Steine. Während anderswo der Massivbau weiter vorherrschte und somit nur lokale Eliten in den Genuss der aufwendigen Steinbauten kamen, konnten sich in der Puuc-Region auch weniger wohlhabende Bevölkerungsschichten ein Steingebäude leisten. Vermutlich reagierten die Maya mit dieser neuen Technik auf ein Anwachsen der Bevölkerung in der Zeit von 750 bis spätestens 1000 n. Chr. Etwa achtzig Prozent aller Gebäude der Region entstanden in diesen Jahrhunderten.

An den Bauten wie auch an den importierten Waren lässt sich ablesen, dass die Region zu jener Zeit aufblühte. Offensichtlich gelangten Obsidian, ein vulkanisches Glas, und Jade aus dem Hochland Guatemalas in die Städte. Aus den Küstenregionen brachten Händler Meeresmuscheln und Feuerstein (fachlich Silex) – da Metall unbekannt war, fertigten die Handwerker des Puuc-Gebietes daraus Werkzeuge und Waffen.

Unterirdische Zisternen für die Trockenzeit

Doch warum erschien dieses Gebiet den Maya überhaupt so attraktiv? Wie erklärt sich die hohe Bevölkerungsdichte von etwa 750 bis 1000 n. Chr.? Regen hatte den Kalksteinboden der Halbinsel im Laufe der Jahrtausende zu Hügeln und Kegeln geformt. In den Senken sammelten sich fruchtbare Böden, die intensiven Ackerbau möglich machten. Doch das war nur eine Seite der Medaille, denn in dem karstigen Gestein versickerte der Regen auch rasch, sodass der Grundwasserspiegel der Puuc-Region etwa sechzig Meter unter der Erdoberfläche lag. Von unterirdischen Höhlensystemen abgesehen fehlten damit sowohl Quellen wie auch Wasserläufe. Zudem wechselte ein sehr feuchter Jahresabschnitt von Juni bis September mit einem sehr trockenen von Oktober bis Mai ab.

Die Maya meisterten die Unbillen der Natur und bauten unterirdische, bis zu 30 000 Liter Wasser fassende Zisternen, die Chultunes. Daraus schöpften die Menschen – auch zur Bewässerung der Felder – während der Trockenzeit das kostbare Nass. Grundnahrungspflanzen, vor allem Mais, Bohnen und Kürbisse, pflanzten die Bauern zu Anfang der Regenzeit, mit Beginn der Trockenzeit wurden sie geerntet und für den weiteren Jahresverlauf gelagert. Ergänzend dazu gab



INSTITUT FÜR ALTAMERIKANISTIK UND ETHNOLOGIE, UNIVERSITÄT BONN

IBERO-AMERIKANISCHES INSTITUT PREUSSISCHER KULTURBESITZ, BERLIN

Der zweistöckige Palast von Xkipché – hier die Westfassade – demonstrierte zu Zeiten der Maya die Macht lokaler Eliten. Das Schwarzweißbild rechts zeigt den Zustand 1893, wie ihn der deutsche Forscher Teobert Maler fotografiert hat.

es kleinere Küchengärten, welche die Haushalte mit Gewürzen, Chili-Sorten und Heilpflanzen versorgt haben. Da größere Haustiere wie Kuh und Schwein bis zur Ankunft der Spanier im 16. Jahrhundert unbekannt waren, kam nur selten Fleisch auf den Tisch: Vereinzelt erlegten die Männer Wild, an den Küsten wurde Fisch gefangen, mitunter lieferte ein domestizierter Truthahn wertvolles Protein.

Viele prosperierende Siedlungen der Puuc-Region entwickelten sich bis Ende des 10. Jahrhunderts zu kleineren Städten. Einige erlangten sogar überregionale Bedeutung. Zum Beispiel wohnten bis zu 30 000 Einwohner in Uxmal. Ein Netz von bis zu sechs Meter breiten und etwa dreißig Kilometer langen Straßen verband diese Stadt mit anderen in der Region. Die Verkehrswege waren gut konstruiert: Sie bestanden aus einem Fundament aus Bruchsteinen mit einem leicht gewölbten Überzug aus Kalkmörtel, der starke Regenfälle rasch ablaufen ließ.

Demgegenüber war Xkipché nur ein kleiner Ort, der in seiner Blütezeit vermutlich nicht mehr als 2000 bis 3000 Einwohner beherbergte und 278 Gebäude umfasste. Immerhin die Hälfte davon bestand aber aus Stein – arm war man dort nicht. Die Bauten waren keineswegs gleichmäßig über das Stadtgebiet verteilt, sondern zu acht Gruppen angeordnet, häufig auf geschlossene oder zu einer Seite offene Höfe hin ausgerichtet. Eine Gebäudegruppe im Ortskern bestand aus kleineren Gebäuden und zwei Pyramiden – hier lag vermutlich das religiöse Zentrum. Dafür spricht auch, dass dort keine Gegenstände des Alltagslebens wie Mahlsteine und Feuerstein gefunden wurden; auch Zisternen fehlen dort. Eine benachbarte Gruppe von Bauten hatte davon hingegen reichlich. Niedrige Grundmauern als Fundament für Aufbauten aus pflanzlichen Materialien belegen auch einfache Hütten aus Holz und Ästen. Lebte und arbeitete dort die einfache Bevölkerung?

Das Zentrum der Macht lag sicher im Palast, und der dürfte mit knapp fünfzig Zimmern in der Region seinesgleichen gesucht haben: Im Laufe der Jahrhunderte ließen die lokalen Herrscher ständig neue Komplexe anbauen, vermutlich um ihren wachsenden Einfluss zu verdeutlichen. Doch nichts währt ewig: Was immer um das Jahr 1000 das Tiefland erschüttert hat, es hinterließ auch hier Spuren: Die Nordfassade und das zweite Stockwerk auf dem Ostflügel sollten wohl noch prächtiger werden; davon zeugen Reihen sauber ausgearbeiteter Säulchentrommeln auf zwei Gesimsbändern. Doch offenbar blieben die Bauarbeiten unvollendet. Steinerne Türpfosten und Türstürze fanden wir, fertig bearbei- ▶



INSTITUT FÜR ALTAMERIKANISTIK UND ETHNOLOGIE, UNIVERSITÄT BONN

So wie in dieser Simulation hätten die Herrscher von Xkipché ihren Palast vermutlich gern gesehen: Als Ausdruck eines wachsenden Repräsentationsbedürfnisses wurde das alles überragende Hauptgebäude an einen alten Kern angebaut. Die beiden quer dazu stehenden Flügel kamen später hinzu. Doch nach Jahrhunderten reger Bautätigkeit wurden die Arbeiten plötzlich eingestellt. Das mit einem Pfeil gekennzeichnete erste Stockwerk konnte nicht mehr vollendet werden: Der Untergang der Maya-Kultur in der Puuc-Region hatte Xkipché erreicht.

Die Maya heute

Cortez und die Folgen

Etwa 97 Millionen Menschen leben heutzutage in Mexiko, davon stammen etwa 10 Millionen von indianischen Völkern ab. Doch nur Ruinen erinnern an die Hochkulturen ihrer Vorfahren, die zwischen etwa 1200 v. und 1521 n. Chr. in Mexiko existierten. Die Gegenwart dieser indigenen Bevölkerung sieht anders aus.

Am 21. April 1519 landete der Spanier Hernando Cortez mit rund 600 Soldaten nahe dem heutigen Veracruz. In nur zwei Jahren vernichteten die Eroberer 3000 Jahre Zivilisation. Gewalt, Ausbeutung und von den Europäern eingeschleppte Krankheiten töteten etwa 24 Millionen Indianer innerhalb von kaum hundert Jahren. Die verbleibende Million wurde zu Menschen dritter Klasse degradiert.

Auch die Unabhängigkeit Mexikos 1821 änderte an dieser Situation wenig – die Kreolen genannten Nachkommen der Spanier blieben an der Macht. Um 1840 erhoben sich die Maya, um die weißen Grundbesitzer von Yukatan zu vertreiben – vergeblich. In Einzelfällen gelangten auch Indianer in hochrangige Positionen: Präsident Benito Juárez war Zapoteke. Als Frankreich versuchte, seine Machtposition als Gläubigerland auszunutzen und den Habsburger Maximilian im Jahr 1864 als Kaiser in Mexiko einzusetzen, gelang es Juárez, die Unabhängigkeit seines Landes zu bewahren.

So sehr dieser Mann nach wie vor Heldenverehrung erfährt – die Situation seiner Bevölkerungsgruppe hat sich bis heute nicht verbessert. Als die Regierung 1988 durch eine Agrarreform die Privatisierung des Landbesitzes förderte – Teil eines Maßnahmenpakets, um den Anschluss an die Weltwirtschaft zu erreichen –, traf sie damit auch die indianische Bevölkerung, der ihre tradierte Lebensweise genommen wurde. Der Eintritt in die Weltwirtschaft wurde in den folgenden Jahren vom Aufstand des Zapatistischen Nationalen Befreiungsheers EZLN erschwert, einer Rebellenarmee, die zumeist Indianer des südlichen Bundesstaates Chiapas rekrutiert und für bessere Lebensbedingungen der indigenen Bevölkerung eintritt.

Versuche gemäßigter Politiker, dem Bürgerkrieg durch Reformen zu begegnen, scheiterten am Widerstand der Hardliner. Während die Regierung immer wieder Verhandlungsangebote unterbreitet, unterstützt sie gleichzeitig paramilitärische Einheiten im Kampf gegen die EZLN. Rund 20 000 Indigenas wurden bereits aus ihren Gemeinden in Chiapas vertrieben.

Im Zweifelsfall haben Indianer, die der Rebellion angeklagt werden, vor Gericht wenig Chancen: Mexikanische Gerichte akzeptieren unter Folter erzwungene Geständnisse als Beweismittel. Morddrohungen und Überfälle auf die Büros von Nichtregierungsorganisationen belegen, dass eine wirkliche Gleichstellung der indigenen Bevölkerung vorläufig nicht zu erwarten ist.



INSTITUT FÜR ALTAMERIKANISTIK UND ETHNOLOGIE, UNIVERSITÄT BONN

Erinnerungen an eine glorreiche Vergangenheit: Die Hauptpyramide von Chichen Itza ist heute eine viel besuchte Touristenattraktion.

tet, vor den Räumen, deren Eingang sie einmal bilden sollten. Andere Gebäude in Xkipché zeigen das gleiche Bild: Anhäufungen von Werksteinen an schon fertig gestellten Grundmauern. Als hätten die Maurer ihren Arbeitsplatz von einem Tag auf den anderen verlassen.

Es ist 12 Uhr mittags, das Quecksilber erreicht im Schatten 42 Grad. Unter unseren deutschen Grabungspraktikanten macht sich Unmut breit: Sie hatten wohl geheimnisvolle Maya-Paläste im Urwald erwartet und ein wenig Indiana-Jones-Feeling. Jetzt stehen sie schwitzend in der zeckenverseuchten Savanne vor ein paar unscheinbaren Steinhaufen. Sie zeichnen Geröll und katalogisieren Silexabschläge. Das mag zwar wenig spektakulär sein, doch seit dem Frühjahr 2002 hat sich der Schwerpunkt unserer Grabungen vom Palast zu den Tempel- und Wohnbezirken verlagert. Was die jungen Leute enttäuscht, interessiert die mexikanischen Maya-Arbeiter: „Die hier gelebt haben – unsere Ahnen – waren so arm wie wir.“ Mit Palästen können sie wenig anfangen: Die seien wohl das Werk von Riesen, erklären sie uns.

Kein Abfall, keine Stadtbewohner

Für das Leben der einfachen Bevölkerung interessieren sich Archäologen erst seit etwa fünf Jahren. Keramiken und Werkzeuge auf den Fußböden der einstigen Häuser deuten ebenfalls auf einen plötzlichen Exodus hin. Hatte sich das Klima verändert, sodass der Regen ausblieb? Im mexikanischen Bundesstaat Quintana Roo, östlich des Puuc-Gebietes, haben Archäobotaniker Proben aus Seesedimenten analysiert und darin Pollen aus dem 9. und 10. Jahrhundert n. Chr. gefunden. Sie stammen von Pflanzen, die eher an trockenere Umweltbedingungen angepasst waren, was tatsächlich auf eine Klimaveränderung hindeutet.

Eine weitere Theorie unterstellt kriegerische Auseinandersetzungen zwischen den Maya-Stadtstaaten. Demnach hätte sich im Norden der Halbinsel Yukatan unter der Führung der mächtigen Metropole Chichen Itza eine Allianz gegen die Städte der Puuc-Region gebildet. Gab es offene Kämpfe? Darüber lässt sich nur spekulieren, doch in Uxmal haben Archäologen Indizien dafür gefunden: Unmittelbar nach dem Ende jeder Bautätigkeit um 920 n. Chr. tauchen dort sonst nur aus der Region von Chichen Itza bekannte Keramikprodukte auf – waren es Hinterlassenschaften der Eroberer? Kurze Zeit später wurden die Städte des Puuc von den lokalen Eliten und bald darauf auch vom Großteil der einfachen Bevölkerung aufgegeben.

BEIDE FOTOS: INSTITUT FÜR ALTAMERIKANISTIK UND ETHNOLOGIE, UNIVERSITÄT BONN

Dieses kleine Tempelgebäude südöstlich der Hauptpyramide von Xkipché wurde von den Archäologen teilweise rekonstruiert; im Bild zwei Säulen, die linke trägt ein Kapitell. Das kleine Foto rechts zeigt eine rekonstruierte Zisternenöffnung. Der gemauerte Umfassungsring hielt Blätter fern, das Regenwasser lief durch vier Öffnungen hinein. Ein pfropfenartiger Stein verschloss die Zisternenöffnung.

Dieses Schicksal hatte auch Xkipché ereilt. Doch nicht alle Menschen verließen den Ort. Einige blieben und richteten sich in den noch unversehrten Räumen ein oder fledderten die zu Ruinen verfallenden Bauten für neue, einfache Behausungen. Wir haben in der letzten Grabungskampagne solche Unterkünfte ausgegraben. Eine Gruppe von sechs Gebäuden war auf einem Platz nordöstlich einer der beiden Pyramiden errichtet worden. Zuvor müssen dort kleinere Tempel und Altäre gestanden haben. Den noch intakten Stuckboden, der diesen Bereich überzog, haben die Dagebliebenen weiter genutzt.

Ihre Häuser standen nur noch auf kleinen Plattformen aus Bruchsteinen und dem Material zerstörter Bauwerke. Es waren anscheinend lang gestreckte Gebäude, nur ein bis zwei Meter schmal und nach Westen oder Osten hin offen. Für die Ewigkeit ist dort nicht mehr gemauert worden – die Überreste sind deutlich weniger gut erhalten als ältere Ruinen. Auch der östlich angrenzende Platz verkam bald nach der Konstruktion der Plattformen immer mehr: Wir fanden mehrere flüchtig und ohne Fundamentierung angelegte Stuckböden. Zu unserer Überraschung hatten die Bewohner eine alte Zisterne halb mit einer Plattform zugebaut. Das spricht nun nicht unbedingt für einen übergroßen Wassermangel als Ursache des Exodus. Grabungen belegen zudem, dass die Zisterne längere Zeit nicht gesäubert wurde.

Wie wenig von dem einstigen Glanz Xkipchés blieb, belegt auch das ärmliche Fundinventar jener Zeit nach dem Zusammenbruch: Einfache Keramik, einige schmale Obsidianklingen und einfachste Werkzeuge aus Feuerstein dominieren. An einem Altar mussten schlichte Wassergefäße die Opfergaben aufnehmen. Kurz: In den Trümmern der einst bedeutenden Stadt hauste eine Bevölkerung, die über keine materiellen Reichtümer mehr verfügte. Sie war vermutlich nicht einmal in der Lage, aufwendige Reparaturen durchzuführen.

Lang haben auch diese Menschen nicht mehr ausgeharrt: Indizien für eine längere Nutzungsdauer wie etwa Abfallhaufen fehlen, die Gebäude scheinen nur kurze Zeit bewohnt worden zu sein. Wir hoffen, dass uns die nächsten Kampagnen und die Auswertung der zahlreichen Artefakte dazu neue Informationen bringen. Im kommenden Jahr wollen wir einen etwas außerhalb liegenden Wohnkomplex mit mehreren Zisternen untersuchen. Das Drama der Puuc-Region hatte viele Gesichter. Auch Indiana Jones würde heute vielleicht eher nach aussagekräftigem Alltagsgerät in Schutthaufen auf die Jagd gehen. ■

Literaturhinweise

Die Geschichte einer Maya-Siedlung: Forschungsergebnisse aus den Ausgrabungen von Xkipché. Von Michael Vallo in: Maya – Gottkönige im Regenwald. Von Nikolai Grube, Eva Eggebrecht und Matthias Seidel (Hg). Könemann Verlagsgesellschaft, Köln 2000.

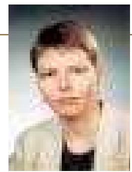
Península Yucatán. Von Teobert Maler. Aus dem Nachlass herausgegeben von Hanns J. Prem (Hg.). Mann Verlag, Berlin 1997.

Xkipché: Eine Mayasiedlung im nördlichen Yucatán, Mexiko. Von Markus Reindel. Beiträge zur Allgemeinen und Vergleichenden Archäologie, Heft 17, S. 177, Mainz 1997.

Chronicle of the Maya Kings and Queens. Von Simon Martin und Nikolai Grube. Thames and Hudson, London 2000.

*Weblinks zum Thema bei **www.spektrum.de** unter „Inhaltsverzeichnis“*





Michael Vallo *hat in Altamerikanistik promoviert; er leitet die Grabungen in Xkipché. Die Archäologin **Iken Paap** ist dort technische Grabungsleiterin. Beide sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Institut für Altamerikanistik und Ethnologie (IAE) der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität in Bonn.*

KLIMA

Letzter Blick in schmelzendes Klimaarchiv

Wer in Afrika auf Gletschereis wandern möchte, sollte sich sputen. Denn in knapp zwei Jahrzehnten dürfte es keines mehr geben. Dann wird die Eiskappe des 5895 Meter hohen Kilimandscharo in Tansania völlig abgetaut sein – seit 1912 ist sie bereits um achtzig Prozent geschrumpft.

Mit ihr schwindet zugleich ein einzigartiges Archiv des afrikanischen Klimas. Lonnie G. Thompson und seine Mitarbeiter von der Ohio State University haben es daher schnell noch untersucht. In Bohrkernen aus dem Kilimandscharoeis erkannten sie drei große Dürreperioden: Die erste dauerte vor 8300 Jahren rund fünf Jahrhunderte an; sie verrät sich durch große Mengen von Fluorid- und Natrium-Ionen im Eis.

Den zweiten Klimawandel vor rund 5200 Jahren markiert ein plötzlich absinkender Gehalt des Sauerstoff-18-Isotops, das als Maß für die Niederschlagsmenge gilt. Just in dieser kühlen und trockenen Ära gründeten die bis dahin als Jäger und Sammler lebenden Menschen der Region erstmals Siedlungen.

Eine Staubschicht im Eis zeigte schließlich, dass die dritte Dürreperiode, welche die damals bewohnbare Sahara bis heute in Wüstengebiet verwandelte, vor etwa 4000 Jahren begann. *(Science, 18. 10. 2002, S. 589)*



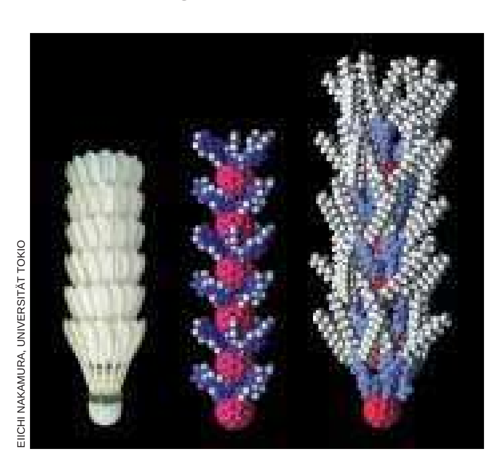
Einsam kündet dieser Eisblock auf dem Kilimandscharo von einem ehemaligen großen Gletscherfeld – auch dasjenige im Hintergrund wird vermutlich in 15 Jahren verschwunden sein.

MATERIALFORSCHUNG

Molekularer Federball

Erfinderisch zeigten sich Chemiker der Universität Tokio im Umgang mit Kohlenstoff-„Fußbällen“: Sie spickten die aus 60 Atomen bestehenden Fullerene mit aromatischen Gruppen, an denen zwei längere Molekülketten baumelten, und machten sie so zu Federbällen. Bloße Spielerei? Keineswegs. Die molekularen Federbälle lassen sich wie ihre makroskopischen Gegenstücke nämlich problemlos stapeln, ja sie tun es sogar freiwillig. Das Besondere an den Stapeln: Sie sind polar – oben und unten lässt sich klar unterscheiden. Überdies können sie sich zu einem zweidimensionalen Wabengitter aneinanderlagern – einem so genannten Flüssigkristall.

Solche Strukturen im Übergangsbereich zwischen Festkörper und Flüssigkeit finden sich heute in den Flachbildschirmen aller Laptops. Die Flüssigkristalle aus den Federballstapeln unterscheiden sich allerdings in einem wichtigen Punkt von denjenigen aus herkömmlichen stabförmigen Molekülen: Sie sind stets als ganze polar; wie auch immer sich die Stapel nämlich zusammenlagern, es gibt keine Anordnung, bei der zwei benachbarte Stapel stets entgegengesetzte Orientierungen haben, sodass sich ihre Polarität aufhebt. Diese Eigenschaft verspricht interessante neue technische Anwendungsmöglichkeiten. *(Nature, 17. 10. 2002, S. 702)*



EIICHI NAKAMURA, UNIVERSITÄT TOKIO

Stapel aus Federbällen – echten wie molekularen – sind polar: Sie haben verschiedene Enden.

ZOOLOGIE

Kupfergehärteter Zahn

Zur Verteidigung, zur Nahrungsaufnahme und als Stützgerüste bilden Lebewesen harte mineralische Strukturen wie Zähne, Knochen oder Panzer. Eine bislang einzigartige Variante dieser Biomineralisation entdeckten Forscher der Universität von Kalifornien in Santa Barbara und der österreichischen Montanuniversität Leoben jetzt bei dem primitiven Ringelwurm *Glycera dibranchiata*, einem bis zu vierzig Zentimeter langen räuberischen Bodenbewohner im Gezeitenbereich des Nordatlantiks.

Er verfügt über vier spitze Hohlzähne, mit denen er seine Beute – andere Ringelwürmer oder Kleinkrebse – packt und dabei ein Gift injiziert. Das gelähmte Opfer schlingt der Vielborster dann ähnlich wie eine Schlange nach Möglichkeit ganz hinab.

Die vier Giftzähne bestehen zu einem hohen Prozentsatz aus dem toxischen Schwermetall Kupfer in Form des Minerals Atacamit. Sie sind dadurch fast so hart wie der Zahnschmelz der viel höher entwickelten Wirbeltiere und nutzen sich deshalb nicht ab, wenn der Wurm bei der Nahrungssuche mit ihnen durch den Meeressand pflügt.



MONTANUNIVERSITÄT LEOBEN

In die Zähne eingebautes Kupfer macht *Glycera dibranchiata* zum erfolgreichen Raubtier.

Wie *G. dibranchiata* das giftige und eher seltene Kupfer unbeschadet anreichern kann und warum er ausgerechnet dieses problematische Metall bevorzugt, ist noch ein Rätsel. Die Forscher vermuten, dass es neben der Zahnhärtung noch eine weitere Funktion erfüllt: Vielleicht dient es als Katalysator, der eine harmlose, gut speicherbare Vorform des Giftes erst während der Injektion aktiviert. *(Science, 11. 10. 2002, S. 389)*



OHIO STATE UNIVERSITY

WAHRNEHMUNG

Einseitiger Kompass

Unter einäugigen Zugvögeln ist derjenige König, dessen rechtes Auge noch funktioniert. Wie Forscher um Wolfgang Wilschko an der Universität Frankfurt jetzt feststellten, sitzt hier nämlich der magnetische Kompass. Nach heutigem Wissensstand ist es allerdings eigentlich ein chemischer: Durch Licht bereits angeregte Moleküle gehen je nach Ausrichtung der Fotopigmente im Magnetfeld in einen anderen angeregten Zustand über und dienen so als Richtungsgeber.

In den Versuchen der Frankfurter Forscher konnten sich Rotkehlchen, nachdem ihr linkes Auge zugeklebt worden war (Bild), noch genauso mühelos zurechtfinden wie zuvor: Beim Umpolen des künstlichen Magnetfeldes wechselten sie gleichfalls die Zugrichtung. War dagegen das rechte Auge abgedeckt, verloren die Tiere völlig die Orientierung. Diese Einseitigkeit spiegelt sich auch im Gehirn wider: In der linken Hirnhälfte der Rotkehlchen sind jene Kerngebiete stärker entwickelt, die sich mit der Verarbeitung magnetischer Richtungsinformationen befassen. Der Vorteil der Aufgabenteilung ist, dass die Tiere so in der rechten Hälfte Kapazität für andere Aufgaben frei haben. (*Nature, 3. 10. 2002, S. 467)*



JOACHIM TRAUDT / NATURE

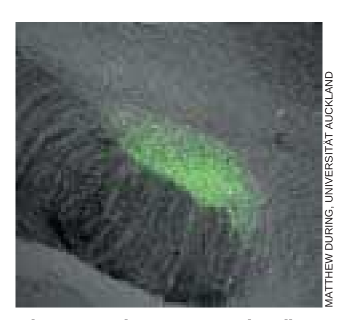
Mit abgedecktem linkem Auge können sich Rotkehlchen immer noch am Erdmagnetfeld orientieren.

MEDIZIN

Gentherapie der Schüttellähmung?

Jedes Jahr erkranken schätzungsweise 15 000 Deutsche an der Parkinson'schen Krankheit. Verursacht wird sie durch das allmähliche Absterben jener Gehirnzellen, welche den hemmenden Botenstoff Dopamin produzieren. Ohne diesen Gegenspieler kann der erregende Neurotransmitter Glutamat die Nerven bestimmter Gehirnregionen dann unablässig stimulieren, was zum typischen Erscheinungsbild der Schüttellähmung führt.

Die bisherige Behandlung besteht darin, das Gehirn künstlich mit dem fehlenden Dopamin zu versorgen, was allerdings nur begrenzte Zeit hilft. Deshalb hatte ein Forscherteam um Matthew During von der Universität Auckland nun die originelle Idee, stattdessen das erregende Glutamat mit Hilfe des Enzyms Glutaminsäure-Decarboxylase in die beruhigende Substanz Gamma-Aminobuttersäure (GABA) umzuwandeln. Dazu muss allerdings das Gen für dieses Enzym in die betroffenen Hirnzellen eingeschleust und aktiviert werden. Die Wissenschaftler koppelten es daher an ein Adenovirus und infizierten damit Ratten, die an Parkinson-Symptomen litten. Die Ergebnisse klingen ermutigend: Schon nach wenigen Monaten waren bei fast siebzig Prozent der Versuchstiere die Symptome deutlich abgeklungen. Erste Tests an schwer kranken Patienten sollen schon bald folgen. *(Science, 11. 10. 2002, S. 425)*



MATTHEW DURING, UNIVERSITÄT AUCKLAND

Die grüne Fluoreszenz zeigt die erfolgreiche Übertragung des Gens für ein heilsames Enzym ins Rattenhirn an.

ASTROPHYSIK

Massemonster im Mittelpunkt der Milchstraße

Im Zentrum unserer Galaxis wirbelt ein Schwarzes Loch mit der Masse von fast drei Millionen Sonnen. Erstmals lieferte ein Forscherteam dafür nun den zweifelsfreien Beweis: Eine Kooperation unter Führung des Max-Planck-Instituts für extraterrestrische Physik in Heidelberg geriet auf die Spur eines Sterns, der auf einer elliptischen Bahn um eine geheimnisvolle Radioquelle im Mittelpunkt der Milchstraße kreist. Diese ist als Sagittarius A bekannt und seit Jahren heißer Kandidat für ein Schwarzes Loch.

Das auffällige Verhalten seines Begleiters enttarnte Sagittarius A nun endgültig als Massemonster auf engstem Raum, dessen gigantischer Gravitation nicht einmal Licht entkommt. Der Stern rast mit 5000 Kilometern pro Sekunde um ihn herum, 200-mal so schnell, wie sich die Erde um die Sonne bewegt. Für einen Umlauf benötigt er gerade einmal 15 Jahre und nähert sich Sagittarius A dabei bis auf 17 Lichtstunden, kaum mehr als der dreifache Abstand zwischen Sonne und Pluto. Überschwere Schwarze Löcher wie Sagittarius A werden im Zentrum fast jeder massereichen Galaxie vermutet. (*Eso, 16. 10. 2002*)



MEDIZIN

Krebs aushungern – die

Forscher wollen das Aussprossen neuer Blutgefäße gezielt beeinflussen, um vielfältige Krankheiten von Krebs bis Herzinfarkt zu therapieren. Etliche potenzielle Medikamente werden inzwischen am Menschen erprobt.

Von Rakesh K. Jain und Peter F. Carmeliet

Sie schlängeln sich durch unseren ganzen Körper, bilden im wahren Sinne des Wortes seine Lebensadern. Mal schimmern sie als fein gesponnenes Netzwerk durch die Haut, mal treten sie als seilartige dicke Stränge hervor. Gewöhnlich schenken wir ihnen kaum Beachtung – es sei denn vielleicht, wir haben uns geschnitten. Zu Unrecht: Blutgefäße, und gerade die kleinsten, feiner noch als ein Haar, spielen eine zentrale Rolle bei vielen chronischen Erkrankungen.

So schafft erst das Wachstum neuer Blutkapillaren die Voraussetzungen dafür, dass Tumoren sich vergrößern und weit im Körper ausbreiten. Es ist auch mit schuld an Erblindungen, zu denen es bei vielen Diabetikern kommt. Umgekehrt trägt ein Mangel an neu erzeugten Kapillaren ebenfalls zu Krankheiten bei: etwa zum weiteren Untergang von Herzmuskelgewebe nach einem Infarkt. Wie viele andere Wissenschaftler versuchen deshalb auch wir die Mechanismen hinter einem krankhaften Gefäßwachstum zu verstehen. Mit solchem Wissen lassen sich leichter neue Wirkstoffe entwickeln und optimieren, die das Aussprossen von Äderchen blockieren oder – wo erwünscht – gezielt fördern.

Die Erforschung der Angiogenese, wie das Wachstum von Blutkapillaren wisssenschaftlich heißt, birgt in der Tat ein enormes medizinisches Potenzial. Die an Tieren ermittelten Ergebnisse der letzten Jahre wurden von den Medien begeistert aufgegriffen und weckten großes Interesse bei pharmazeutischen und biotechnologischen Unternehmen. Dutzende dieser Firmen verfolgen inzwischen neue therapeutische Ansätze, die auf der Angiogenese basieren. Mehr als dreißig Wirkstoffe für oder gegen das Gefäßwachstum werden bereits am Menschen erprobt. Die Liste medizinischer Probleme, die sich damit angehen ließen, ist ziemlich lang (siehe Kästen auf Seite 49 und Seite 51). Der Schwerpunkt liegt aber eindeutig auf Substanzen, die eine Angiogenese hemmen und gegen Krebs zum Einsatz kommen sollen. Um sie geht es vorrangig auch hier.

HURD STUDIOS



große Herausforderung

Ein bestechendes Konzept: Neue potenzielle Medikamente sollen nicht den Tumor selbst attackieren, sondern ihn von der Blutversorgung abschneiden. Was im Tierexperiment hervorragend funktioniert, lässt sich allerdings nicht so leicht in die therapeutische Praxis umsetzen.

Als im vergangenen Jahr die Ergebnisse erster klinischer Tests mit mehreren solchen Substanzen vorgestellt wurden, machte sich eine gewisse Ernüchterung breit: Nur wenige der behandelten Krebspatienten zeigten eine Besserung. Man sollte aber stets bedenken, dass die erste Phase klinischer Prüfung ausschließlich darauf zugeschnitten ist, die Sicherheit der Substanzen beim Menschen auszuloten. Dazu verwenden die Forscher extrem niedrige Dosierungen und erhöhen sie langsam schrittweise. Wenn der menschliche Körper das potenzielle Medikament hinreichend gut verträgt, läuft die zweite Phase an. Jetzt prüfen Mediziner an einer kleinen Gruppe von Patienten unter anderem, ob das Mittel überhaupt anschlägt und welche Dosis optimal ist. Nebenwirkungen beispielsweise dürfen die Vorteile nicht aufheben. In der dritten Phase mit einer großen Zahl von Patienten an verschiedenen Kliniken schließlich muss die Wirksamkeit endgültig bewiesen und der Nutzen gegen die Risiken abgewogen werden. Immerhin haben einige „Angiogenese-Hemmer“ inzwischen diese dritte Phase erreicht (siehe Tabelle auf Seite 50). Nehmen sie auch diese Hürde, kann ihr Hersteller die behördliche Zulassung für die getestete Anwendung beantragen.

Die Angiogenese an sich ist kein krankhafter Vorgang. Der Begriff bezeichnet im engeren Sinn jenen Prozess, bei dem vorhandene Blutkapillaren sich bei Bedarf verzweigen und verlängern. Ihre Wand besteht aus nur einer einzigen hauchzarten Lage so genannter Endothelzellen. Durch sie gelangen Nährstoffe und Sauerstoff in die Umgebung. Ohne Angiogenese könnte keine Verletzung richtig heilen. Mehr noch: Bei einer geschlechtsreifen Frau würde sich nach der allmonatlichen Menstruation keine neue Schleimhaut aufbauen, und im Falle einer Befruchtung würde auch keine Plazenta entstehen.

Ein fein abgestimmtes Gleichgewicht körpereigener Stoffe reguliert normalerweise das Aussprossen neuer Blutgefäße. Aktivatoren wie der „vaskuläre endotheliale Wachstumsfaktor“ (VEGF) werfen bei Bedarf die Angiogenese an, während Gegenspieler wie Thrombospondin sie abschalten. Zahlreiche solcher Substanzen sind involviert. Wird die delikate Balance dieses Gleichgewichts gestört, entstehen Äderchen zur falschen Zeit am falschen Ort – wie beim Wachstum von Tumoren.

Einem Agitator das Handwerk legen

Das Interesse der Krebsforscher am stofflichen Geschehen der Angiogenese erwachte 1968. Damals fanden zwei getrennte US-Forscherteams erste Hinweise, dass gedeihende Tumoren etwas abgeben, was bestehende Blutgefäße veranlasst, in die Geschwulst einzuwachsen. Eine üppigere Zufuhr von Blut – und damit von Sauerstoff und Nährstoffen – verhilft dem entarteten Gewebe seinerseits zum Wachstum. 1971 schlug Judah Folkman von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) daher in einem Artikel vor, das Aussprossen neuer Blutgefäße zu verhindern, Tumoren damit regelrecht auszuhungern. Vermutlich ließe sich, so meinte der Pionier der Angiogenese-Forschung wenig später, auch die Metastasierung, die Ausbreitung eines Tumors, bremsen. Denn Krebszellen müssen zunächst in die Blutbahn gelangen, um in entfernte Körperregionen vorzudringen.

Die derzeitigen Versuche, Krebs mit Hemmstoffen der Angiogenese zu bekämpfen, setzten an verschiedenen molekularen Angriffszielen an. Die Hauptstrategie richtet sich gegen den Wachstumsfaktor VEGF und illustriert zugleich den langen, steinigen Weg zu einem Medikament. Dieses Protein, im Jahr 1983 von einem Team um Harold F. Dvorak an der Harvard-Universität entdeckt, hieß zunächst vaskulärer Permeabilitätsfaktor. Es entpuppte sich als der häufigste Angiogenese-Stimulator unter allen inzwischen entdeckten körpereigenen Substanzen dieser Art. 1989 isolierte eine Forschergruppe um Napoleone Ferrara von der Bio-Firma Genentech das Gen dieses Proteins. Damit bekamen Wissenschaftler ein wichtiges Werkzeug in die Hand, um die Wirkweise des Wachstumsfaktors besser zu ergründen. Welch bedeutende Rolle er bei der Neubildung von Blutgefäßen spielt, zeigte 1996 eine Genmanipulation an Mäusen. Ferraras Areitsgruppe sowie mein Team (Carmeliet) schalteten eines der beiden Exemplare des VEGF-Gens im Erbgut aus. Die Tiere produzierten dann das Protein nur noch in halber Menge. Sie starben bereits im Mutterleib, weil zu wenige Blutgefäße entstanden und die vorhandenen auch noch fehlerhaft angelegt waren.

Derzeit verfolgen Forscher mehrere Wege, um bei Patienten entweder das VEGF-Protein selbst oder seine Signalwege zu blockieren. Zu den verwendeten Wirkstoffen gehören:

- Antikörper, die sich gezielt an diesen Wachstumsfaktor heften und ihn blockieren,
- löslich gemachte Varianten des natürlichen Zell-Rezeptors, die den Faktor ködern, bevor er an den Rezeptor der Blutkapillaren andocken kann,
- niedermolekulare chemische Substanzen, die in die Zellen eindringen und dort einlaufende Wachstumssignale noch rechtzeitig abblocken könnten,
- Botenstoffe wie Interferon, mit denen sich die Produktion von VEGF drosseln lässt,
- so genannte Metalloproteinase-Inhibitoren, die verhindern, dass der Faktor aus molekularen Speichern in der Matrix um die Zellen freigesetzt wird. Die Matrix ist jener Kleber, der Zellen im Gewebeverband zusammenhält.

Für eine effektive Krebstherapie muss das VEGF-Protein in den Tumoren eines Patienten wahrscheinlich völlig lahm gelegt werden. Dies ist ein schwieriges Unterfangen, denn selbst winzige Spuren des hochwirksamen Eiweißstoffes könnten – anders als im Embryo – die Endothelzellen der Blutgefäße im Tumor vor dem erwünschten Untergang bewahren. (Er wirkt auf sie auch lebensbewahrend.) Und selbst wenn das Protein vollständig ausgeschaltet ist, bleibt einem Tumor vermutlich noch der Rückgriff ▶

IN KÜRZE

- An Menschen werden derzeit **zahlreiche potenzielle Medikamente** getestet, die das Aussprossen neuer Blutgefäße fördern oder hemmen, also in die so genannte Angiogenese eingreifen. Im Visier ist ein breites Spektrum an Krankheiten – vorrangig aber Krebs und Herzinfarkt.
- **Angiogenese-Hemmer** sind im Allgemeinen sicher und verglichen mit Cytostatika sogar weniger toxisch. Sie werden aber alleine kaum für eine effektive Krebstherapie ausreichen. Vielmehr dürften sie nur in Kombination mit den etablierten Strategien – Operation, Chemo- und Strahlentherapie – den erhofften Erfolg bringen.
- Die **Blutgefäße in Tumoren** sind krankhaft verändert. Überraschenderweise scheinen Angiogenese-Hemmer solche Gefäße zunächst zu „normalisieren“, ehe sie mehr und mehr davon untergehen lassen. Positiver Effekt: Andere Wirkstoffe gegen Krebs können in dieser Phase den Tumor besser erreichen.

Die zwei Seiten der Angiogenese

Bei etlichen Krankheiten wachsen Blutgefäße übermäßig. Hier kommt eine Therapie mit Hemmstoffen der Angiogenese in Betracht (rechte Spalte). Bei einigen anderen Störungen hingegen könnten Patienten von Mitteln profitieren, die eine Angiogenese sogar zusätzlich ankurbeln (linke Spalte). Der Stern * verrät, welche Anwendungen am Menschen gerade erprobt werden.

Wo neue Blutgefäße helfen könnten:

Glatzenbildung
Haarfollikel brauchen eine gute Blutversorgung.

Neurodegenerative Erkrankungen
Bessere Durchblutung dürfte Hirnschäden minimieren.

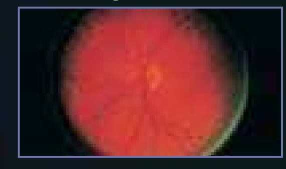
Koronare Herzkrankheit*
Neue Herzkranzgefäße könnten Schäden am Herzmuskel verringern helfen.

Knochenbrüche
Blutgefäße sind unverzichtbar für das Verheilen von Frakturen.

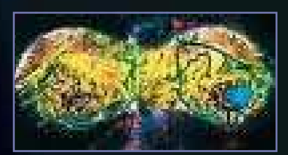
Gefäßverschlüsse in Beinen*
Ein natürlicher „Bypass“ um blockierte Adern könnte die Durchblutung verbessern.

Wo zu viele Blutgefäße ein Problem sind:

Erkrankungen der Netzhaut *
Fehlplatzierte neue Blutgefäße im Auge können zur Erblindung führen.



Krebs *
Neue Blutgefäße verhelfen einem Tumor zum Wachstum.



Arteriosklerose
Auch die Plaques, die Adern verengen, wachsen unter Umständen durch eine zusätzliche eigene Blutversorgung mit Kapillaren zu gefährlicher Größe heran.



Endometriose
Existiert irgendwo im Körper versprengte Gebärmutterschleimhaut, so baut auch sie nach jeder Menstruation eine eigene Blutversorgung auf.



Fettleibigkeit
Fettgewebe braucht zur Versorgung ein kilometerlanges Kapillarnetz – Hemmstoffe der Angiogenese bieten auch hier vielleicht einen neuen therapeutischen Hebel.



Angiogenese als Therapie

Wenn mehr Blutgefäße besser sind

Weltweit untersuchen Forscher, ob die natürlichen Angiogenese-Stimulatoren, die sie bei Krebs blockieren wollen, ihrerseits zur Behandlung bestimmter anderer Erkrankungen taugen. Wer etwa einen Herzinfarkt erlitten hat oder wem einer droht, weil Herzkranzgefäße verengt sind, könnte vom Aussprossen neuer Blutgefäße profitieren. Analog gilt dies für Menschen mit Durchblutungsstörungen der Beine.

Ursache eines Herzinfarkts ist ein Blutgerinnsel in einer jener Arterien, die den Herzmuskel versorgen. Wird die Blockade nicht rasch genug beseitigt, stirbt das unversorgte Areal ab. Bleibt das Umfeld schlecht durchblutet, gehen darin Zellen, die sich noch erholen könnten, in den Freitod. Durchblutungsstörungen der unteren Extremitäten wiederum sind eine häufige Spätfolge der Zuckerkrankheit, weil das Leiden die Adern angreift. Sie setzen sich leicht zu. Nach wie vor drohen deshalb am Ende Amputationen.

In all diesen Fällen, so die Hoffnung, könnten körpereigene Angiogenese-Stimulatoren wie der „vaskuläre endotheliale Wachstumsfaktor“ (VEGF) therapeutisch hilfreich sein. Statt ein solches Protein direkt zu verabreichen, ließe sich seine Produktion auch auf gentherapeutischem Wege steigern. Entsprechend veränderte Viren, Zellen oder selbst Stücke „nackter“ DNA mit dem Gen für VEGF oder für andere Stimulatoren müssten dazu in das Zielgewebe eingeschleust werden.

Forscher erproben eine Therapie mit VEGF oder dem Fibroblasten-Wachstumsfaktor (FGF) seit über zehn Jahren im Tierversuch. 1991 fand ein Team um Stephen H. Epstein von den US-amerikanischen Gesundheitsinstituten in Bethesda (Maryland) erste Hinweise, dass der Fibroblasten-Faktor die Angiogenese im Herzmuskel fördert. Ein Jahr später injizierten Paul Friedmann und seine Mitarbeiter am Baystate Medical Center in Springfield (Massachusetts) das Protein in die Hinterbeine von Kaninchen, um das Aussprossen neuer Blutgefäße anzuregen. Mitte der 1990er Jahre zeigte schließlich eine ganze Reihe von Forschergruppen – darunter die von Epstein –, dass eine Behandlung mit Angiogenese-Stimulatoren oder mit deren Genen neue Blutgefäße in Herz und Gliedmaßen von Versuchstieren wachsen lässt.

Mittlerweile wird in klinischen Studien geprüft, ob solche Proteine im therapeutischen Einsatz sicher und wirksam sind. Einige Forscher, darunter auch wir, testen das Potenzial weiterer viel versprechender Wachstumsfaktoren. Doch bleiben enorme Herausforderungen. Funktionsfähige Blutgefäße sind nicht ohne weiteres zu erzielen. Es geht nun darum, die besten Kombinationen aus mehreren Wachstumsfaktoren zu ermitteln, ihre optimale Dosierung, das günstigste Verabreichungsschema und die beste Darreichungsform. Einige Wissenschaftler

auf andere körpereigene Stoffe. In Frage kommt etwa der so genannte basische Fibroblasten-Wachstumsfaktor oder der Immun-Botenstoff Interleukin 8, die beide ebenfalls die Angiogenese fördern.

Ein weiterer intensiv untersuchter Ansatz besteht darin, körpereigene Hemmstoffe der Angiogenese zu verabreichen oder ihre Produktion im Organismus zu steigern. Noel Bouck von der Northwestern University in Evanston (Illinois) hatte solch eine Substanz 1989 identifiziert: das Thrombospondin. Diese Entdeckung elektrisierte Folkman, vor allem angesichts einer altbekannten Erfahrung unter Chirurgen: Sobald der ursprüngliche Tumor operativ entfernt war, begannen manchmal kleinere bereits vorhandene Tochtergeschwülste beschleunigt zu wachsen – fast so, als hätte der Primärtumor etwas abgesondert, was das Wachstum kleinerer Metastasen zuvor in Schach hielt.

Die Schlussfolgerung konnte natürlich nicht lauten, den Hauptkrebsherd eben nicht zu entfernen. Denn er hat oft ganze Organe und Gewebe im Würge-

Hoffnungsträger bei Krebs – eine Auswahl

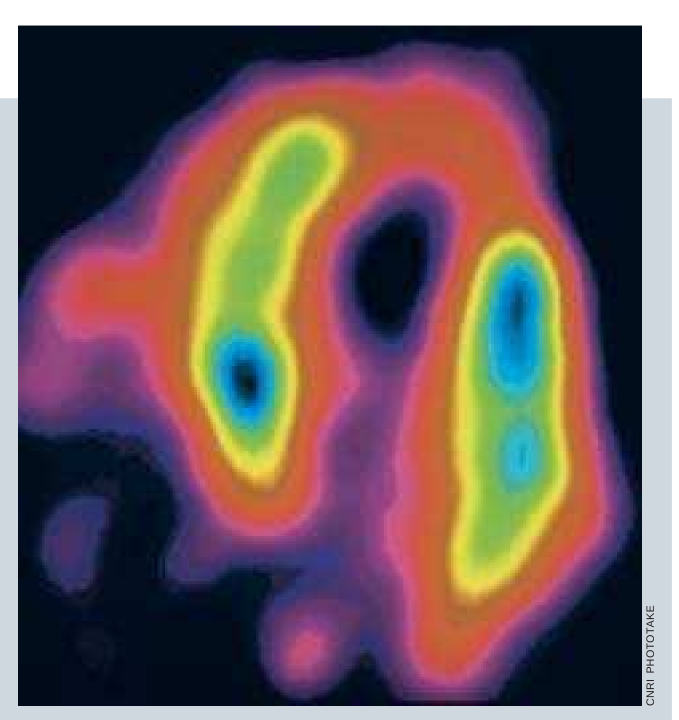
An Krebspatienten werden derzeit mehrere Substanzen als Angiogenese-Hemmer getestet, die das letzte Prüfungsstadium vor einer Zulassung erreicht haben. Studien mit ähnlichen Substanzen laufen auch an Patienten mit Makula-Degeneration. Bei dieser häufigen Augenerkrankung sprossen Blutgefäße in die Netzhaut ein, besonders an der Stelle schärfsten Sehens. Die Patienten büßen schließlich fast ihre gesamte Sehkraft ein.

Produkt	Unternehmen	Art und Wirkweise	im Test gegen
Avastin	Genentech	monoklonaler Antikörper gegen den Wachstumsfaktor VEGF, der die Angiogenese fördert	Brust- und Darmkrebs
BM-S275291	Bristol-Myers Squibb	synthetische Verbindung mit mehreren Effekten	nicht-kleinzelliges Bronchialkarzinom
Interferon alpha	Roche, Schering-Plough	Das Immunprotein drosselt die Abgabe von Wachstumsfaktoren wie VEGF und wird schon lange bei gutartigen Tumoren des Blutgefäßsystems eingesetzt.	verschiedene Tumoren
Neovastat	Aeterna	natürlicher Angiogenese-Inhibitor mit vielfältigen Eigenschaften	nicht-kleinzelliges Bronchialkarzinom, Nierenkrebs
Thalidomid	Celgene	organisches Molekül, das als Lepra-Medikament zugelassen ist; wie es die Angiogenese hemmt, ist noch unbekannt	Nierenkrebs und multiples Myelom

untersuchen zudem, ob sich Blutgefäße leichter regenerieren, wenn endotheliale Stammzellen – Vorläufer jener Endothelzellen, die sich zu Blutgefäßen formieren – transplantiert werden. Es handelt sich dabei um adulte Stammzellen, die sich auch bei Erwachsenen noch aus dem Knochenmark isolieren lassen.

Bei aller Hoffnung gilt es aber auch abzuwägen. So könnte eine – ausdrücklich erwünschte – Förderung der Angiogenese mit einem erhöhten Krebsrisiko einhergehen. Winzige ruhende Tumoren erlangen vielleicht dadurch unverhofft eine eigene Blutversorgung und vergrößern sich. Fatalerweise könnte solch eine Therapie selbst im Fall eines Herzinfarkts unangemessen sein und ausgerechnet die Weiterentwicklung jener Plaques begünstigen, die das Grundübel der Erkrankung darstellen. Denn ab einer bestimmten Größe benötigen arteriosklerotische Plaques für ihren Unterhalt ebenfalls neue Blutgefäße. Wie relevant diese Befürchtungen sind, wird sich erst am Ende der angelaufenen Studien ermessen lassen.

Wir setzen aber darauf, dass eines Tages die individuellen Anteile an fördernden und hemmenden Faktoren der Angiogenese schon vor einer Therapie bei jedem Patienten bestimmt werden können. Wir dürften dann eher verstehen, warum die Mangeldurchblutung eines Herzmuskels bestehen bleibt: Fehlt es an Stimulatoren oder sind zu viele Inhibitoren der Angiogenese vorhanden? Selektivere Strategien werden die therapeutische Angiogenese jedenfalls zielgenauer machen.



Herzmuskel in Not: **Blau und Grün kennzeichnen Areale mit einer Mangeldurchblutung, wie sie bei einer *Angina pectoris* oder Herzinfarkt typisch ist. Wirkstoffe, die ein rasches Aussprossen neuer Blutgefäße ermöglichen sollen, werden derzeit getestet.**

griff. Obendrein wäre er eine ständige Quelle für absiedelnde Krebszellen und damit von noch mehr Metastasen. Vielleicht aber ließen sich die „Absonderungen“ eines Haupttumors, so Folkmans Idee, in Medikamente ummünzen, die sowohl kleine Metastasen als auch den Ursprungstumor am Weiterwachsen hindern. Mit seinen Forscherkollegen gelang es ihm, zwei andere natürliche Hemmstoffe zu isolieren: 1994 das Angiostatin und 1997 das Endostatin. Das Interesse an den beiden Molekülen ist groß, vor allem weil Folkmans Gruppe nachwies, dass sich bei Mäusen damit Tumoren sogar völlig vernichten lassen. Ein großer Report über diese Erfolge auf der Titelseite der „New York Times“ tat 1998 ein Übriges, um das weite Forschungsfeld der Angiogenese in der Öffentlichkeit bekannt zu machen.

Klinische Studien an einer kleinen Zahl von Patienten laufen. Endostatin erwies sich als unbedenklich und hat offenbar keine gravierenden Nebenwirkungen. Bei manchen Patienten schrumpften die Tumoren immerhin langsam.

Das Aussprossen neuer Blutgefäße in einem Tumor zu verhindern ist eine Sache. Wie weit lässt sich aber zugleich etwas gegen bereits bestehende Adern darin ausrichten? Es gilt, sie gezielt auszuschalten, ohne das übrige Netz in normalen gesunden Geweben zu schädigen. Diesen Ansatz bezeichnen Fachleute manchmal als anti-vaskuläre Therapie, um ihn von der anti-angiogenetischen Therapie im engeren Sinne zu unterscheiden. Allerdings können die meisten Angiogenese-Hemmer zugleich die Rückbildung von Adern anregen, die sich in letzter Zeit entwickelt haben.

Paradoxe Effekte

Insgesamt sind die Blutgefäße in Tumoren krankhaft verändert. Sie wirken ungeordnet, sind verdreht, erweitert und undicht. Obendrein tragen sie auf ihrer Oberfläche oft Varianten aus der Molekülklasse der so genannten Integrine, die auf normalen ausgewachsenen Blutgefäßen höchstens in Spuren vorkommen. Vor wenigen Jahren haben nun Forscher spezielle „Protein-Schnipsel“ konzipiert, die vorrangig die Integrine auf Adern in Tumoren besetzen. Im Prinzip handelt es sich bei den kleinen als RGD-Peptide bezeichneten Molekülen um ein ganz kurzes Stück einer Aminosäurekette, die in den natürlichen Bindungspartnern dieser Integrine vorkommt. Es ließe sich als eine Art zielfindende Rakete einsetzen: Ein als Gefechtskopf angekoppeltes Zellgift würde sich im Tumor anreichern, ohne normales Körpergewebe in Mitleidenschaft zu ziehen. Ein weiteres Konzept: gerinnungsfördernde Moleküle als Fracht der „Minis“ in den Tumor schicken; die dort entstehenden Blutgerinnsel würden die Versorgungswege verstopfen.

Trotzdem – in der Praxis dürfte es ein Problem bleiben, wirklich alle Blutgefäße eines Tumors mit solchen Strategien zu treffen. Selbst innerhalb eines einzigen Blutgefäßes können die Zellen der Innenwand stark voneinander abweichen. Rund 15 Prozent der Adern in menschlichen Dickdarm-Karzinomen erwiesen sich bei Untersuchungen in einem unserer Labors (Jains) als heterogen: Einige Zellen tragen beispielsweise ein bestimmtes Protein auf ihrer Oberfläche, andere nicht. Was wäre, wenn ausgerechnet Proteine von Tumor zu Tumor oder je nach Wachstumsstadium oder Vorbehandlung sogar innerhalb eines Tumors variieren, die den Angriffspunkt für neue Wirkstoffe darstellen? Dann dürfte es schwer werden, eine zukünftige Therapie allein auf neue Wirkstoffe zu gründen, die sich gegen Blutgefäße richten.

Sicherlich werden Operationen und/oder Bestrahlungen deshalb auch weiterhin nötig sein, um den primären Krebsherd im Körper möglichst vollständig zu beseitigen. Zusätzlich erhalten Patienten heute oft eine Chemotherapie: Vor der Hauptbehandlung soll sie Tumoren verkleinern, danach dann Krebszellen beseitigen, die noch irgendwo im Körper verblieben sind. Ein Wirkstoff, der die Angiogenese im weitesten Sinne hemmt, ließe sich durchaus mit jeder dieser herkömmlichen Therapien kombinieren, um deren Erfolgsraten bei Patienten zu verbessern.

Bahnbrechende Arbeiten an Tieren leistete hierzu Beverly Teicher in Harvard während der 1990er Jahre. Mehrere For- ▶

schergruppen haben die Vorteile eines derartigen Ansatzes experimentell bestätigt. Solch eine Kombinationstherapie kann Mäuse sogar von Krebs heilen, wie vor kurzem Folkman, Robert Kerbel von der Universität Toronto und Jains Gruppe feststellten.

Dass ausgerechnet eine Therapie, die sich gegen Blutgefäße richtet, die Erfolgsaussichten der etablierten Behandlungsoptionen verbessert, war gänzlich unerwartet. Denn Chemotherapeutika benötigen auf jeden Fall Blutgefäße, um einen Tumor überhaupt zu erreichen. Bestrahlungen wiederum töten Zellen nur dann effizient ab, wenn die Versorgung mit Sauerstoff ausreichend ist. Die energiereiche Strahlung lässt schädliche freie Sauerstoff-Radikale entstehen. Die Logik würde daher eigentlich gebieten, dass Hemmstoffe der Angiogenese letztlich die Wirksamkeit von Chemo- und Strahlentherapie verschlechtern. Doch ist inzwischen klar, dass Cytostatika – sowie Nährstoffe und Sauerstoff – während der Behandlung mit einigen bestimmten Angiogenese-Hemmern vorübergehend ihr Ziel besser erreichen als vorher.

Den Grund dafür entdeckten Forscher unter Leitung von Jain: Hemmstoffe der Angiogenese merzen zunächst überschüssige defekte Blutgefäße aus, während sie die relativ guten noch eine Weile schonen. Bei Mäusen wurden stark aufgeweitete, undichte Tumorgefäße enger und dichter. Alles in allem schien die Behandlung das Adersystem vorübergehend zu „normalisieren“, ehe sie dem Tumor schadete (siehe Fotos Seite 53). Sollten sich diese Befunde auf den Menschen übertragen lassen, müssen Ärzte allerdings noch die optimale Dosierung und das richtige Timing für solche Mittel herausfinden.

Die erste Generation von Medikamenten ist gewöhnlich noch nicht so effektiv wie spätere. Damit künftige Hemmstoffe der Angiogenese besser werden, müssen Forscher allerdings auch ihre Untersuchungsmethoden verfeinern. Bevor ein Wirkstoff an Menschen getestet wird, findet die vorklinische Prüfung an Tieren statt. Meist geschieht dies derzeit an Tumoren, die künstlich unter der Haut von Versuchstieren, vor allem von Mäusen, gezüchtet werden. Gerade dort gibt es beim Menschen allerdings nur sehr selten Krebsgeschwülste. Für realistischere Versuchsbedingungen bedarf es daher geeigneter Tiermodelle, beispielsweise krebsanfälliger Mäuse-Linien, bei denen Tumoren von selbst an jenen Stellen entstehen, die natürlicherweise häufiger betroffen sind.

Da vorklinische Studien Zeit und Geld verschlingen, läuft ein Versuch gewöhnlich nur so lange, bis die Tumoren sich messbar verkleinert haben. Die Forscher können sich dann aber nicht sicher sein, dass eine Behandlung den Krebsherd vollständig auszumerzen vermag. Selbst aus einer geringen Anzahl verbliebener Krebszellen kann er wieder aufflackern. Wir finden es daher unverzichtbar, behandelte Tiere über längere Zeiträume zu beobachten. Das wahre Potenzial neuer Substanzen lässt sich dann besser ermessen.

Außerdem verabreichen Wissenschaftler ihren Tieren die zu testenden Substanzen oft schon, bevor ein experimenteller Tumor richtig Fuß gefasst hat. In dieser Phase sind Krebsgeschwülste aber besonders leicht angreifbar. Auch dies dürfte dazu beitragen, dass manches Ergebnis aus solchen Versuchen zu positiv ausfällt. Gewöhnlich wachsen Tumoren im Tiermodell überdies schneller als beim Menschen. Wenn Wirkstoffe bei einem solchen schnell wachsenden Krebs gut greifen, tun sie dies nicht zwangsläufig bei langsamer wachsenden menschlichen Tumoren.

Eine weitere Forderung: Es müssen auch Kombinationen verschiedener Angiogenese-Hemmer getestet werden. Krebszellen können sich meisterhaft Therapien entziehen, weil sie stark mutieren und weil dadurch immer wieder Varianten mit anderen Eigenschaften entstehen. Wir wissen inzwischen, dass jeder Tumor eine ganze Palette unterschiedlicher Substanzen produziert, die das Aussprossen neuer Blutgefäße fördern. Und dieses Arsenal kann er beim Wachstum variieren und erweitern. Es dürfte für ihn ein Leichtes sein, auf einen anderen Proteinfaktor auszuweichen, wenn der eine, etwa VEGF, durch ein Medikament blockiert wird. Es ist daher schon heute absehbar, dass eine optimale Therapie wohl einen ganzen Cocktail von Angiogenese-Inhibitoren verlangt.

Sofern die Hemmstoffe ihr anfängliches Versprechen im Kampf gegen Krebs einlösen, müssten Patienten sie nach der konventionellen Behandlung vermutlich lebenslang einnehmen, um einem Wiederaufflackern ihrer Krankheit vorzubeugen. Es gibt sogar die Idee, Menschen mit einer bekannten Veranlagung für bestimmte Formen von Krebs derartige Mittel schon vorbeugend zu verabreichen. Dazu müssten sich solche Wirkstoffe aber auch bei langfristiger Anwendung als sicher erweisen.

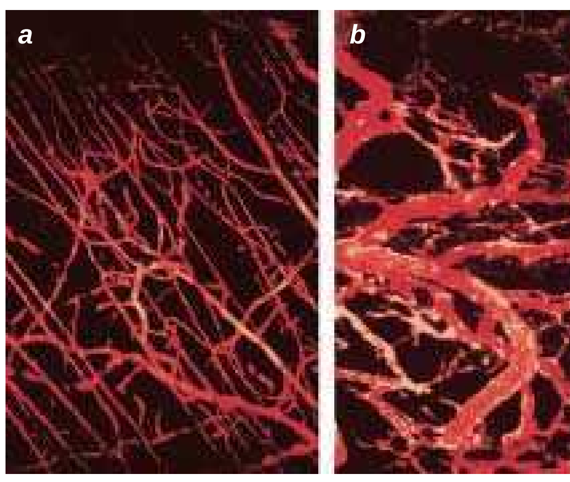
Immerhin hat ein bestimmtes Interferon, das indirekt die Angiogenese hemmt, in niedriger Dosierung über die Jahre hinweg keine problematischen Nebeneffekte bei Kindern gezeigt, die an Hämangiomen litten. Diese an sich gutartigen Blutgefäßtumoren können lebensbedrohlich werden, wenn sie beispielsweise in der Lunge entstehen und den Patienten zu ersticken drohen.

Wie steht es aber um die anderen Angiogenese-Hemmer? Die laufenden klinischen Studien mit Krebskranken werden jedenfalls zur Frage der Langzeitsicherheit noch keinen Aufschluss liefern, denn sie untersuchen nur eine kürzere, mehrmonatige Einnahme. Erkenntnisse an Tieren deuten für einige Wirkstoffe aber leider an, dass sie für eine therapeutische oder vorbeugende Langzeitanwendung gegen Krebs womöglich nicht unbedenklich genug sind. Beispielsweise entwickeln ge-

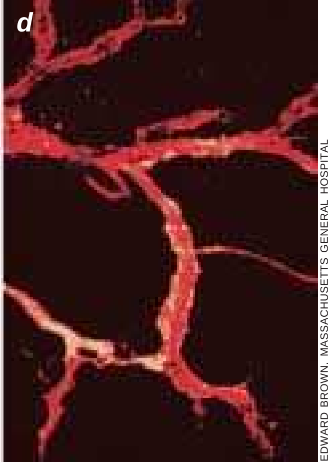
Hoffen und Bangen

Angiogenese-Hemmer sind keine Wundermittel gegen Krebs. Ein Beispiel dafür bietet das Avastin. Dieser monklonale Antikörper richtet sich gegen den Wachstumsfaktor VEGF, der das Aussprossen neuer Blutgefäße anregt. Bei einer aktuellen klinischen Studie an Patienten mit metastasierendem Nierenkrebs konnte er zwar das Fortschreiten der Erkrankung deutlich verzögern, doch verkleinerten sich die Tumoren nur äußerst selten.

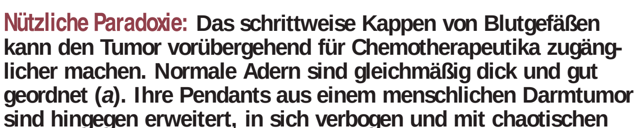
Eine andere klinische Studie mit Avastin endete jüngst hingegen enttäuschend. Hier erhielten Patientinnen mit fortgeschrittenem metastasierendem Brustkrebs, die schon Rückfälle erlitten hatten, den Angiogenese-Hemmer zusammen mit dem Krebsmittel Capecitabin. Diese Kombination brachte keine Vorteile gegenüber dem Mittel allein. Weder verzögerte der Antikörper das Fortschreiten der Erkrankung, noch überlebten mehr Patientinnen länger als ein Jahr. Wie Judah Folkman, der Pionier der Angiogenese-Forschung, hierzu in der Fachzeitschrift *Nature Reviews Cancer* jüngst erläuterte, gibt es eine mögliche Erklärung für diesen Fehlschlag: Nur wenige der Tumoren haben den Wachstumsfaktor VEGF in einer aktiven Form erzeugt. Er plädiert dafür, die Tumoren vorher besser auf ihre Eigenschaften zu untersuchen. Dann ließe sich eher absehen, ob der individuelle Krebs überhaupt ansprechen kann. *Inge Hoefer*







EDWARD BROWN, MASSACHUSETTS GENERAL HOSPITAL



Nützliche Paradoxie: Das schrittweise Kappen von Blutgefäßen kann den Tumor vorübergehend für Chemotherapeutika zugänglicher machen. Normale Adern sind gleichmäßig dick und gut geordnet (*a*). Ihre Pendants aus einem menschlichen Darmtumor sind hingegen erweitert, in sich verbogen und mit chaotischen Querverbindungen versehen (*b*). Angiogenese-Hemmer merzen zunächst überflüssige, nicht funktionsfähige Adern aus, was die Gefäßversorgung „normalisiert“ (*c*). Dadurch können Chemotherapeutika leichter ans Ziel gelangen. Wenn schließlich weitere Gefäße absterben, wird dem Tumor quasi der Hahn zugedreht (*d*).

netisch manipulierte Mäuse, wenn sie weniger Wachstumsfaktor VEGF produzieren, nach einiger Zeit neurologische Defizite. Dies ergaben Experimente in einem unserer Labors (Carmeliets).

Krebs in Schach, Herz in Not?

Bekanntlich kann auch eine zu schwache Neubildung von Blutgefäßen zu Krankheiten beitragen. Beispiel Herzinfarkt: Dazu kommt es, wenn ein Blutpfropf eine Herzkranzarterie blockiert. Wird sie nicht rasch wieder geöffnet, treibt vor allem der Sauerstoffmangel das nicht mehr versorgte Herzmuskelareal in den baldigen Untergang. Eine zu langsame Angiogenese kann die Erholung von solchen Schäden behindern, weil Zellen, die den unmittelbaren Infarkt überlebt haben, aber in einem nun dauerhaft schlecht durchbluteten Bereich liegen, Selbstmord begehen. Aber auch hier werden einige innovative Therapien bereits erprobt – diesmal um die Angiogenese gezielt zu fördern (siehe Kasten auf Seite 50/51).

Damit deutet sich gleichzeitig eine potenzielle Gefahr von Hemmstoffen an. Als unerwünschte Nebenwirkung solch einer Krebstherapie steigt eventuell das Risiko, dass unterversorgte Gebiete des Herzmuskels sich nicht regenerieren. Wie bei jeder Therapie werden Ärzte und Patienten deshalb die Risiken und Vorzüge sorgfältig gegeneinander abwägen müssen.

Trotzdem – das enorm gewachsene Verständnis der Angiogenese hat zumindest den Fundus an Ideen, wie wir Krebs bekämpfen können, erheblich erweitert. Und neue Konzepte sind nötiger denn je. Zwar vermag eine Strahlen- und Chemotherapie viele Formen von Krebs einzudämmen. Allzu oft aber folgt dann auf eine vorübergehende Periode der Symptomfreiheit ein herber Rückschlag. Der Tumor wächst erneut, Metastasen wuchern, am Ende stirbt der Kranke. Leider fehlen preiswerte, leicht handhabbare Methoden, die verlässlich und empfindlich genug sind, die individuellen Parameter eines Tumors zu ermitteln und die jeweils optimale Therapie für einen Patienten abzuleiten. Die genetische Analyse von Patienten und ihrer Tumoren verspricht hier große Fortschritte. Hilfe erwarten wir in den nächsten zehn bis zwanzig Jahren auch von verbesserten bildgebenden Verfahren, die eine krankhaft veränderte Struktur und Funktion von Blutgefäßen sichtbar macht.

Was die Früherkennung anbelangt, so wird es mit zunehmendem Wissen über die tumorbedingte Angiogenese wohl auch einmal möglich sein, Krebs anhand erhöhter Werte einiger molekularer Marker der Angiogenese rechtzeitig zu diagnostizieren – lange, bevor er sich durch Symptome bemerkbar macht. Die individuelle Mixtur körpereigener Substanzen, die bei einem Patienten die Angiogenese fördern oder hemmen, sowie der Zustand der Blutgefäße im Tumor wären dann hilfreiche Kriterien für den Arzt. Er könnte einen individuell maßgeschneiderten Behandlungsplan entwickeln, in dem zusätzlich zur Standardtherapie ein passender Mix von Angiogenese-Hemmern einen festen Platz einnimmt.

Verfahren zum Nachweis krankhaft veränderter Blutgefäße sollten Ärzte auch in die Lage versetzen, ein gefährliches Wiederaufflackern des Tumors frühzeitig zu erkennen. Sie könnten dann vielleicht noch rechtzeitig Gegenmaßnahmen einleiten. Eines Tages, wenn orale Darreichungsformen unbedenklicher Angiogenese-Hemmer verfügbar sind, bekommen Krebspatienten vielleicht so eine echte Chance, ihre Krankheit mit täglichen Tabletten in Schach zu halten. Am Horizont winkt die Vorstellung, dass sich bislang tödliche Formen von Krebs einmal so weit in den Griff bekommen lassen, dass sie zu chronischen Erkrankungen ähnlich Bluthochdruck oder Diabetes mutieren. Und damit können Patienten immerhin noch viele sinnerfüllte Jahre leben. ■

Literaturhinweise

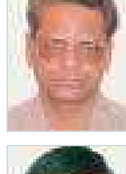
Hoffnung auf ein neues Krebsmedikament. Von Horst Kessler in: SdW 09/2000, S. 49.

Clinical Translation of Angiogenesis-Inhibitors. Von R. Kerbel und J. Folkman in: Nature Reviews Cancer, Bd. 2, S. 727, 2002.

Angiogenesis in Cancer and Other Diseases. Von P. Carmeliet und R. K. Jain in: Nature, Bd. 407, S. 249, 2000.

*Weblinks zum Thema bei **www.spektrum.de** unter „Inhaltsverzeichnis“*





***Rakesh K. Jain** (oben) ist derzeit Andrew-Werk-Cook-Professor für Tumorbiologie an der Medizinischen Fakultät der Harvard-Universität und Direktor des Edwin L. Steele Laboratory am Massachusetts General Hospital. **Peter F. Carmeliet** ist Medizinprofessor an der Katholischen Universität von Leuven in Belgien.*

Die schnellste Nase der Welt

Der Sternmull sieht aus, als käme er von einem anderen Stern. Der Fingerkranz an der Nasenspitze dieses amerikanischen Maulwurfs ertastet Beutetiere mit rasend schnellen Bewegungen.



KENNETH C. CATANIA

Von Kenneth C. Catania

Nasobeme – Nasenschreitlinge – entsprangen der Fantasie von Christian Morgenstern. Der Dichter erschuf sie in seinen „Galgenliedern“. Der kleine Sternmull aus Amerika mit seiner fantastischen Nase aber lebt wirklich. Deutlich sieht man die zweiundzwanzig rosa Anhänge rund um die Nasenlöcher allerdings nur auf Fotos. Denn normalerweise betasten sie immerfort so schnell die Umgebung, dass unser Auge sie überhaupt nicht wahrnimmt.

Als ich diese merkwürdigen Maulwürfe aus dem Nordosten Nordamerikas zu erforschen begann, ahnte ich noch nicht, wie viele Überraschungen die kleinen Insektenfresser bereithalten würden. Nicht nur ihre Nase selbst stellt ein außergewöhnliches Organ dar. Auch ihr Gehirn erweist sich als bemerkenswert spezialisiert. Dies erhellt alte Fragen dazu, wie das Hochleistungsgehirn der Säugetiere entstand und aufgebaut ist.

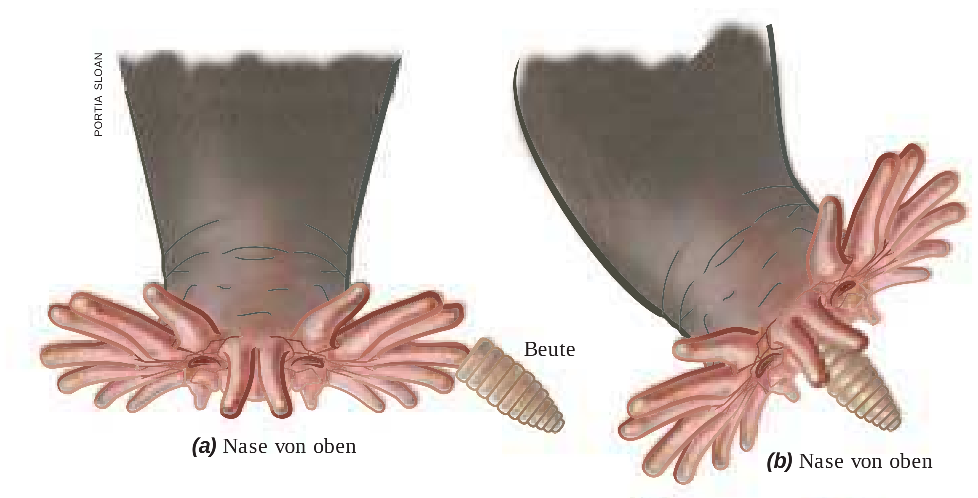
Ein ausgewachsener Sternmull, wissenschaftlich *Condylura cristata* genannt, ist durchschnittlich etwas kleiner als ein Europäischer Maulwurf, *Talpa europaea*. Mit rund fünfzig Gramm wiegt er auch etwas weniger. Systematiker stellen beide Arten zu den Insektivoren und dort in die Familie Maulwürfe oder Talpidae, die weltweit rund dreißig Arten umfasst.

Allerdings suchen Sternmulle nicht nur unter der Erde Beute. Sie jagen auch im Wasser. In ihrem Verbreitungsgebiet, Ostkanada und der Nordosten der Vereinigten Staaten, graben sie ihre Gänge meist dicht unter der Oberfläche in nassem Gelände und im morastigen Grund von Gewässern. Sie jagen auch am Grunde von Tümpeln und Bächen.

Wie andere Maulwürfe besitzt der Sternmull einen sehr raschen Stoffwechsel und weist darum einen sagenhaften Appetit auf. Täglich muss er mindestens so viel verzehren, wie er wiegt, schon um Fettreserven für den harten Winter in seinem Verbreitungsgebiet anzulegen – obwohl er auch dann Beutezüge unternimmt. Außer Regenwürmern, der Hauptnahrung seines europäischen Verwandten, jagt ein Sternmull alles mögliche Getier, das sich im Morast, zwischen verwesenden Blättern und im Bodensatz von Gewässern versteckt hält: darunter Schnecken, Insektenlarven und vielerlei andere kleine Tiere.

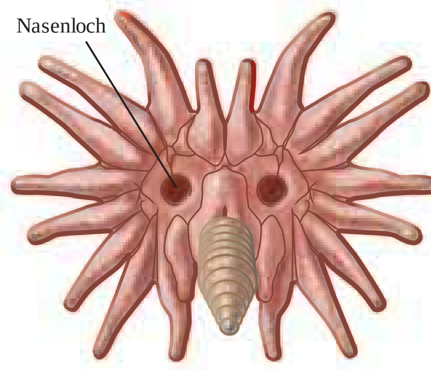
Um im Schlamm und Matsch oder im morastigen Wasser Fressbares zu finden, benutzt dieses seltsame Säugetier den Stern auf seiner Nase. Das Anhängsel dient dem fast blinden Maulwurf mit den im Verhältnis zum Körper riesigen Schaufelhänden aber nicht etwa zum besseren Riechen. Auch stellt es keine extra Hand zum Greifen dar wie der Elefantenrüssel. Das eigenartige hellrosa Gebilde eignet sich vielmehr vortrefflich zum Tasten. ▶

Dem unverwechselbaren Gesicht des Sternmulls wird man selbst in seiner Heimat Amerika kaum je begegnen. Als Maulwurf lebt das Tier im Untergrund. Seine Nase gehört zu den besten der Welt; doch das rosa Sterngebilde dient nicht etwa zum Riechen, sondern zum Tasten beim Fressen.



(a) Nase von oben

(b) Nase von oben



(b) Nase von vorn

Bruchteile einer Sekunde genügen einem Sternmull, um zu entscheiden, ob etwas fressbar ist. Spüren die längeren Sternstrahlen beim Herumtasten der Nasenspitze einen potenziellen Leckerbissen (*a*), nimmt das Tier ihn sogleich ins Visier (*b*): Seine beiden winzigen Supertentakel vor dem Mund erforschen das Objekt blitzschnell genauestens.

Die Empfindlichkeit dieses Tastorgans schlägt alle Rekorde. Als ich zum ersten Mal die Haut des Sterns unter dem Raster-Elektronenmikroskop betrachtete, war ich völlig verblüfft. Erwartet hatte ich locker in der Haut verstreute Taststrukturen. Doch ich erblickte sinnesempfindliche Gebilde dicht an dicht (siehe Kasten rechts). Die Oberfläche des Nasensterns besteht praktisch aus nichts anderem. Das erinnerte mich an die Netzhaut im Auge, in der die Sinnesstrukturen auch eng gedrängt stehen.

Die zweiundzwanzig Nasenanhänge wirken wie gepflastert mit winzigen Noppen. In jedem dieser so genannten Eimer'schen Organe, die nur bei Maulwürfen vorkommen, sitzen drei Sorten von Sinnesrezeptoren. Zwei davon sind übliche Tastrezeptoren von Säugetieren. Der dritte Rezeptortyp ist eine Spezialität bei Maulwürfen.

Einer der beiden gewöhnlichen Rezeptortypen liegt ganz unten in der Basis einer Tastnoppe. Er besteht aus dem Ende eines einzelnen Nervenzellausläufers (einer Nervenfaser), vielschichtig umwickelt von einer Hilfszelle – einer so genannten Schwann'schen Zelle. Dieser Rezeptortyp spricht auf vergleichsweise einfache Reize an, etwa auf Vibrationen. Er meldet auch die erste Berührung eines Objektes mit der Noppe. Darüber sitzt der zweite einfache Rezeptortyp. Diesmal handelt es sich um einen Nervenzellausläufer, der zu einer Merkel'schen Zelle Kontakt hat, einer anderen Art von Hilfszelle. Dieser Typ spricht nur auf anhaltenden Druck auf der Haut an.

Der dritte, besondere Rezeptortyp von Maulwürfen durchzieht den oberen Bereich eines Eimer'schen Organs. Eine Reihe verdickter Nervenfaserenden bilden dicht unter der Hautoberfläche ein kreisförmiges Muster ähnlich einem Speichenrad. Mit Hilfe dieser Struktur erfasst ein Sternmull die Oberfläche berührter Objekte bis in mikroskopische Details. Dies lassen Gehirnableitungen annehmen, die meine Mitarbeiter und ich durchführten.

Auf einer Gesamtfläche von nicht einmal einem Quadratzentimeter trägt der Nasenstern über 25000 Eimer'sche Organe. Insgesamt ziehen von ihm reichlich 100000 Nervenfasern aus, mehr als fünfmal so viele wie von der Hand des Menschen. Deren Botschaften gelangen schließlich bis in die Großhirnrinde, die oberste Instanz des Säugetiergehirns. Dank dieser reichen Ausstattung kann ein Sternmull auf seinen Beutezügen unglaublich rasch genauestens ertasten, was ihm vor die Nase kommt.

Ein waches Tier bewegt seine Nasenspitze und die Tentakeln pausenlos so schnell hin und her, dass unser Auge den Stern gar nicht ahnt. Erst Zeitlupenaufnahmen enthüllten, dass der Mull mit diesem Tastorgan in jeder Sekunde mindestens zwölf verschiedene Stellen berührt. Als wir Sternmullen im Labor Regenwurmstückchen auslegten, brauchten die Tiere gerade eine Sekunde, um fünf solche Brocken zu finden und zu verschlingen.

Noch erstaunlicher ist aber: Der Nasenstern arbeitet in vieler Hinsicht ganz ähnlich wie das menschliche Auge. Man muss nur einmal versuchen, die Augen beim Lesen nicht zu bewegen. Dann merkt man, dass daran zwei funktionell getrennte Systeme mitwirken. Nur in einem ganz kleinen Ausschnitt des Sehfeldes von etwa einem Winkelgrad sehen wir scharf. Diesen Bereich fängt der gelbe Fleck in der Netzhaut auf. Doch die niedrig auflösende übrige Netzhaut, die den Großteil ihrer Fläche ausmacht, lokalisiert mögliche interessante Stellen, die schärfer angeschaut werden sollten. Die Augen vollführen beständig rasche, kurze Bewegungen – Sakkaden. Dadurch richtet sich der Bereich schärfsten Sehens immerfort neu aus. So tastet er gewissermaßen die Umgebung ab.

Gehirnkarten mit überdimensionierten Flächen

Ähnlich benutzen Sternmulle ihren Nasenanhang. Wenn sie durch ihre Gänge kriechen, schauen sie mit dem Stern gewissermaßen immerfort herum, indem sie die ausladende Nasenspitze unermüdlich bewegen. Diese erfasst in jedem Augenblick einen ziemlich großen Ausschnitt der nächsten Umgebung auf einmal, denn dank der vielen langen mit Sinnesrezeptoren gespickten Tentakel bedeckt der Stern eine ziemlich große Fläche. Der Nasenstern besitzt sogar etwas wie einen gelben Fleck, einen Bereich schärfster Wahrnehmung. Sobald einer der Tentakel etwas Interessantes berührt, vor allem etwas vielleicht Fressbares, richtet der Mull den Stern blitzschnell genau darauf aus. Und zwar dreht er die Nase so, dass das untere, viel

STECKBRIEF: Der Sternmull

Wissenschaftlicher Name: *Condylura cristata*
Familie: Maulwürfe
Ordnung: Insektenfresser
Gesamtlänge: bis 21 Zentimeter
Farbe: schwarzbraun bis schwarz
Lebensraum: Sumpf und Feuchtgebiete
Verbreitung: Osten Nordamerikas
Besondere Kennzeichen: rosa Nasenstern mit einzeln beweglichen Tentakeln;
Hände als Grabschaufeln so breit wie lang;
Schwanz ein Drittel der Körperlänge;
kann schwimmen und tauchen;

kürzere Paar der Anhänge das Objekt untersuchen kann. Diese beiden winzigen Fortsätze stehen direkt über dem Mund.

Neurophysiologen zählen die Nasenanhänge beidseits von oben nach unten. Die untersten kurzen Tentakel vor dem Mund nennen sie die elften Fortsätze. Tatsächlich liegen, wie im gelben Fleck, in den elften Tentakeln die Sinnesnerven-Enden besonders dicht. Zudem erinnern die ständigen raschen Bewegungen des Sterns an die ruckartigen Augensakkaden. Denn sie richten die empfindlichste Stelle der Nase immerfort auf besonders verdächtige Punkte aus.

Die Analogie zum Sehen geht noch weiter. Sie erstreckt sich auch auf die Abbildung (im Fachjargon Repräsentation) der einzelnen sinnesempfindlichen Zonen des Nasensterns im Gehirn. Die Gehirngebiete, die Seheindrücke verarbeiten, sortieren sich topografisch nach der Lage der Rezeptoren im Auge. Benachbarte Felder der Netzhaut erscheinen auch im Gehirn nebeneinander. Das ist gut zu erkennen, wenn man die Gehirnareale als Landkarten darstellt. Solche Karten lassen sich auch für die Schnecke im Ohr und für die Haut zeichnen. Die Größenverhältnisse sind allerdings verzerrt: Stets beanspruchen besonders hoch auflösende Bereiche des Sinnesorgans im Gehirn besonders viel Platz. Der gelbe Fleck der Netzhaut etwa ist im Gehirn sehr ausgeprägt repräsentiert. Der Platz dafür ist sogar größer, als er allein auf Grund der Zahl der vom Auge ausgehenden Fasern sein müsste.

Wie würden Gehirnkarten für die tentakelbewehrte Nasenspitze des Sternmulls aussehen? Mein Kollege an der Vanderbilt Universität (in Nashville, Tennessee) Jon H. Kaas und ich haben sie vermessen. Dazu registrierten wir, wo in der Großhirnrinde Nervenzellen aktiv werden, wenn man die Eimer'schen Organe an den einzelnen Tentakeln taktil reizt. Wir fanden für den Nasenstern nicht nur eine, sondern gleich drei Hirnkarten, die jede den anatomischen Aufbau der Nase spiegeln (Kasten Seite 58). Die rechte Sternseite ist in der linken Gehirnhälfte repräsentiert und umgekehrt. Trotzdem staunten wir, als wir die jeweils aktiven Nervenzellen anfärbten: In der Hirnrinde ergeben sich tatsächlich Sternmuster.

Der elfte Anhang, so klein er ist, beansprucht auf den Karten bei weitem den meisten Platz von allen. Dies spiegelt seine große Bedeutung. Im Vergleich zur Zahl der Nervenfasern, die von diesem Tentakel ausgehen, nimmt er sogar verhältnismäßig noch mehr Raum ein – wie der gelbe Fleck. Ebenfalls konnten wir messen, dass der elfte Nasenanhang Oberflächen viel präziser erfasst, als die anderen Tentakel dies können. Die einzelnen Neuronen der Hirnrinde für den elften Anhang reagieren lediglich auf die Reizung eines sehr engen Bereichs auf dem Sinnesorgan. Das heißt, sie sind nur jeweils für ein sehr kleines rezeptives Feld zuständig. Die Neuronen, die für die anderen Tentakel arbeiten, erfassen viel weitere rezeptive Felder, reagieren somit wesentlich unschärfer. Auch das ist beim Sehen genauso.

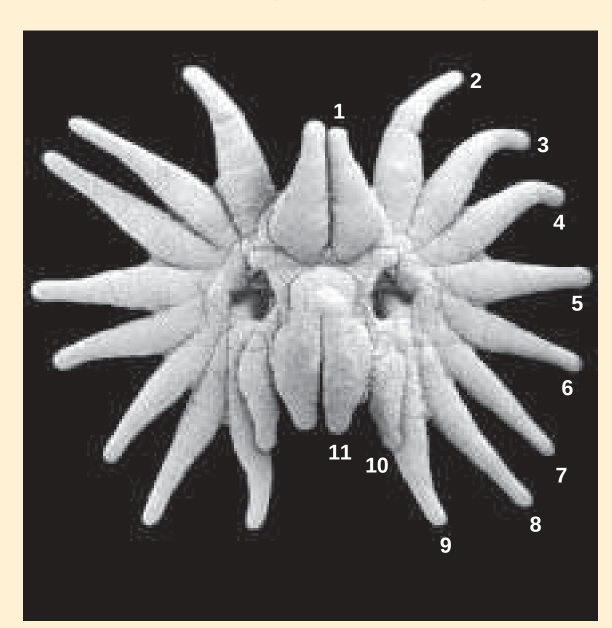
Demnach findet sich auf dem Nasenstern, wie auf der Netzhaut, eine kleine Zone für besonders scharfe Wahrnehmung. Es dürfte sich dabei um ein allgemeines Prinzip handeln. Offenbar entstand diese Lösung immer wieder, wenn es in der Evolution galt, für ein Sinnessystem eine sehr hohe Auflösung zu erreichen. Selbst Hörsysteme können eine Art gelben Fleck aufweisen.

Dies untersuchte der Neurowissenschaftler Nobuo Suga von der Washington University in Saint Louis (US-Bundesstaat Missouri) bei der in Mittel- und Südamerika heimischen Schnurrbartfledermaus (siehe SdW 08/1990, S.98). Viele Fledermäuse bilden die Rufe, anhand deren Echos sie Hindernisse und Beute orten, innerhalb eines sehr engen Frequenzbereichs. Ein Großteil der Hörzellen im Ohr wie auch weite Bereiche des Gehirns sind nämlich darauf spezialisiert, nur eine bestimmte Echofrequenz zu analysieren.

Man mag es kaum glauben, aber Fledermäuse verfügen sogar über ein Pen- ▶

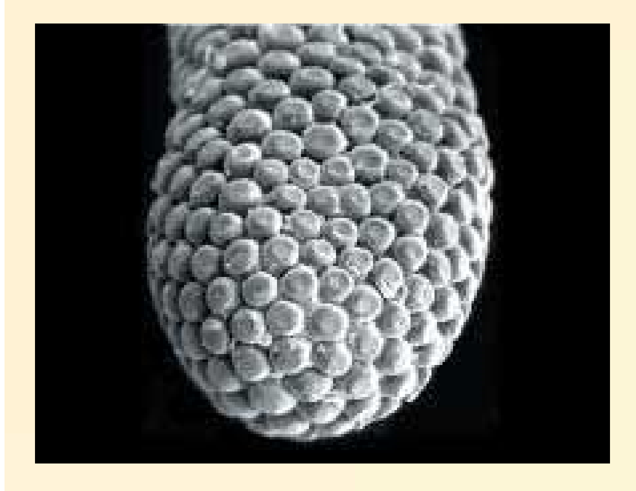
Anatomie des Sterns

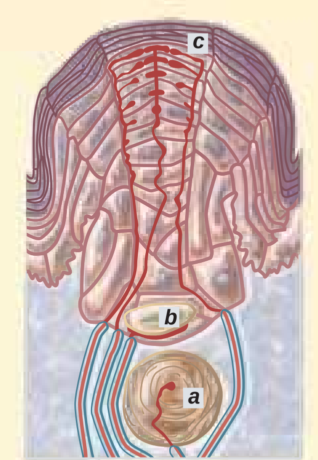
Rekordverdächtiges Tastvermögen



Die Strahlen des Nasensterns (links) werden beidseits von oben nach unten durchnummeriert. In der Mitte sieht man die beiden Nasenlöcher. Die Oberfläche der Strahlen (links unten) besteht ganz und gar aus Sinnesnoppen, den Eimer'schen Organen.

Ein Eimer'sches Organ enthält drei verschiedene Typen von Tastrezeptoren (unten). Der unterste Rezeptor (a) meldet Vibrationen und erste Kontakte. Der mittlere (b) registriert anhaltenden Druck. Dicht außen sitzt der komplizierteste Typ: eine Anordnung verdickter Nervenfaser-Enden (c). Sie erfassen Oberflächen von Objekten erstaunlich genau.





dant zu den Augensakkaden, die den gelben Fleck auf den wichtigsten Punkt im Sehfeld ausrichten. Die Fledermäuse müssen – und können – den Dopplereffekt ausgleichen, also die Verschiebung der Höhe eines Lautes. Die Echofrequenz ändert sich mit der Fluggeschwindigkeit im Verhältnis zum georteten Objekt. Das sind oft Beuteinsekten, die selbst herumfliegen. Leicht würde das Echo außerhalb der Zone schärfsten Hörens geraten. Welche Frequenz sie am besten wahrnimmt, kann eine Fledermaus zwar nicht ändern. Stattdessen verschiebt sie immerfort die Höhe ihrer Rufe. Sie stimmt sie genau so ab, dass das aufgefangene Echo im schärfsten Hörbereich liegt.

Wie erklären sich diese Parallelen bei an sich doch völlig verschiedenen Sinnessystemen? Weshalb entstanden nicht Augen, deren Netzhaut überall scharfe Bilder liefert? Wieso können nicht alle zweiundzwanzig Tentakel des Sternmulls Oberflächen hochpräzise fühlen? Das würde die raschen Augenbewegungen beziehungsweise das atemberaubend schnelle Herumtasten ersparen. Es erforderte allerdings ein vielfach größeres Gehirn, um nur einen besonders offensichtlichen Aspekt zu nennen. Unser Kopf wäre wegen der zusätzlichen Zellen und Nervenfasern mindestens fünfzigmal so groß, wenn jeder Punkt der Netzhaut so scharf sehen könnte wie der gelbe Fleck. Offenbar war die bessere Lösung, wie hochleistungsfähige Sinnessysteme entstehen konnten: Für einen geringen Teil der Sinnesfläche im Gehirn steht besonders viel Verarbeitungskapazität bereit und dieser Ausschnitt wird dann hin und her gefahren.

Vorrang für Tentakel Nummer elf

Je weiter die Studien über die Sinnesleistungen des Sternmulls gediehen, umso mehr neue Fragen tauchten auf. Vor allem wollten wir gern wissen, wie es dazu kommt, dass ein sehr kleiner Bereich der Sinnesfläche übermäßig viel Platz im Gehirn beansprucht. Früher glaubten Neurowissenschaftler, jedem Sinneseingang – jeder Faser, die ins Gehirn zieht – stehe während der Gehirnentwicklung zunächst etwa gleich viel Fläche auf der Hirnrinde zu. Doch so demokratisch wird der Platz nicht vergeben. Eine Reihe von Studien über das Sehsystem von Primaten haben gezeigt, dass Nervenfasern vom gelben Fleck von vornherein verhältnismäßig mehr Fläche auf der Hirnrinde erhalten als Nervenfasern aus der Peripherie der Netzhaut.

Gleiches fanden wir beim Sternmull, als wir die Größe der Hirnrindenareale für jeden Nasententakel mit der Anzahl der Nervenfasern aus den einzelnen Tentakeln verglichen. Nachdem wir reichlich 200 000 solche Fasern gezählt hatten, waren wir sicher: Die einzelnen Sinnesnervenzellen aus Nasenanhang Nummer elf besitzen in der Hirnrinde wesentlich mehr Projektionsfläche als die Neuronen aus den anderen Anhängen.

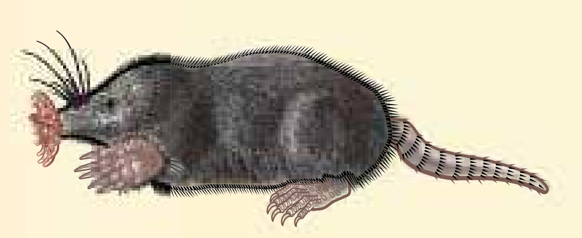
Somit ist der Bereich schärfsten Tastens – wie der schärfsten Sehens – gleich zweifach bevorteilt. Im Sinnesorgan liegen die sensorischen Neuronen hier besonders dicht; und im Gehirn wird der Information jedes einzelnen dieser Neuronen besonders viel Aufmerksamkeit geschenkt.

Wie entsteht das Ungleichgewicht? Wie erlangen bestimmte Sinneseingänge mehr Fläche auf den Gehirnkarten? Diese Frage berührt einen gegenwärtig viel beachteten Aspekt der modernen Hirnforschung. Denn dass sich Größenverhältnisse von Gehirnfeldern verschieben, scheint einerseits beim Erlernen komplexer Aufgaben entscheidend mitzuwirken und andererseits beim Menschen für die Rehabilitation nach Hirnverletzungen oder Schlaganfällen wichtig zu sein. Wie die Gehirnkarten letztlich aussehen, wird zwar durch die Entwicklungsmechanismen wohl auch vorgegeben. Doch sprechen dabei ebenfalls Wahrnehmungserfahrungen mit. Nicht nur während der Hirnreifung, sondern sogar noch im reifen Gehirn herrscht eine gewisse Plastizität.

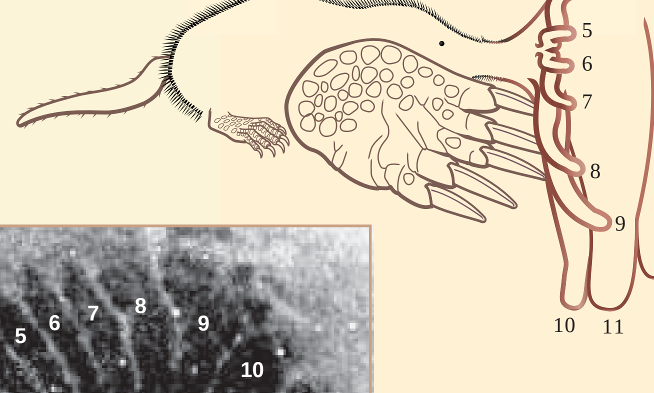
ABBILDUNGEN: KENNETH C. CATANIA

Nasenspitze als Tastauge

Eine Herausforderung für das Gehirn

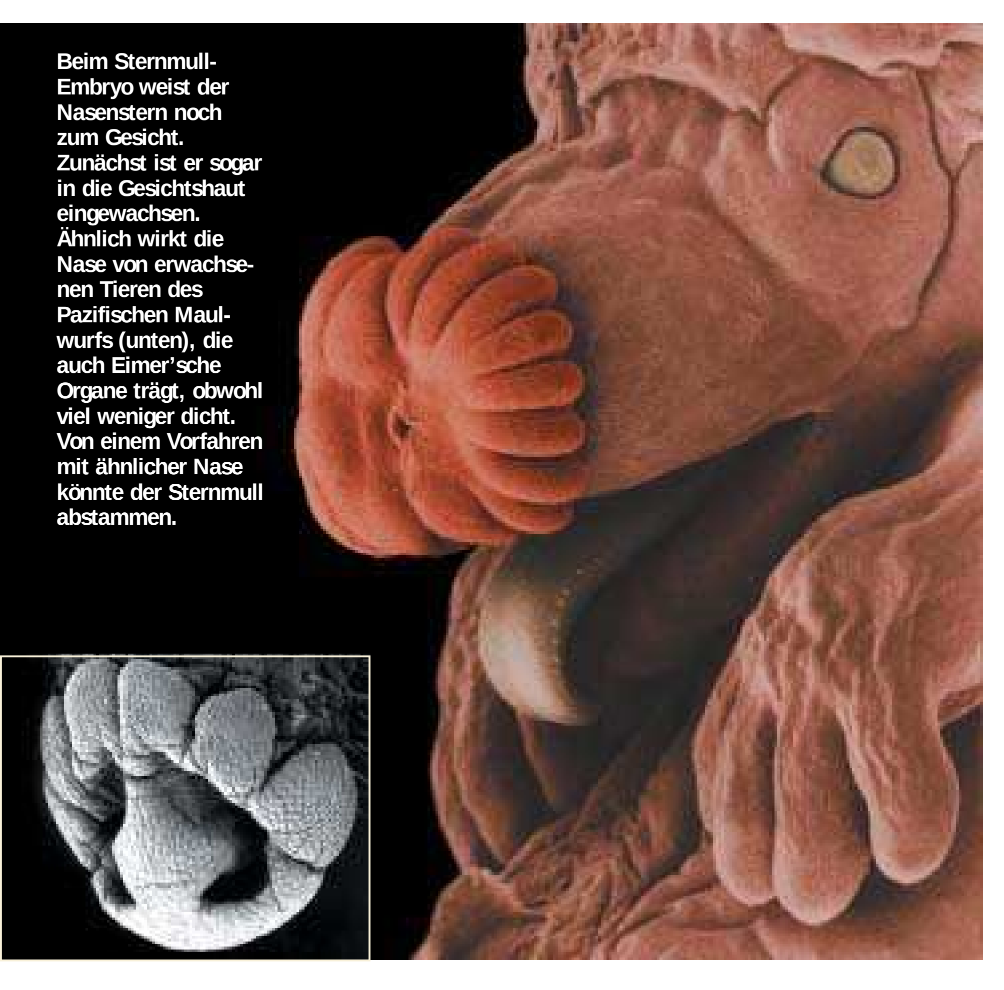


Besonders der Nasenstern, aber auch die Hände eines Sternmulls wären noch viel größer als sowieso schon, wenn ihre Proportionen dem Platz entsprächen, den die Verarbeitung der Sinnesreize im Gehirn einnimmt (siehe Schemazeichnung). Vor allem Tentakel Nummer elf, in der Natur der kleinste, hätte vergleichsweise riesige Ausmaße. Mit diesem Anhang vermag der Mull äußerst scharf zu fühlen – die beiden elften Tentakel stellen gewissermaßen den gelben Fleck des Nasensterns dar, also die Zone für genaueste Wahrnehmung.



In der Hirnrinde ist der Platz für die einzelnen Sternstrahlen sehr ungleich verteilt. Das größte Feld steht dem kleinsten Tentakel Nummer elf zu. Hier ist ein Ausschnitt von einer rechten Hirnrinde gezeigt.

ABBILDUNGEN: KENNETH C. CATANIA; ILLUSTRATIONEN: PORTIA SLOAN



Beim Sternmull-Embryo weist der Nasenstern noch zum Gesicht. Zunächst ist er sogar in die Gesichtshaut eingewachsen. Ähnlich wirkt die Nase von erwachsenen Tieren des Pazifischen Maulwurfs (unten), die auch Eimer'sche Organe trägt, obwohl viel weniger dicht. Von einem Vorfahren mit ähnlicher Nase könnte der Sternmull abstammen.

Die Frage war also, ob und inwieweit beim Sternmull die unterschiedliche Nutzung der einzelnen Nasenanhänge auf die Ausgestaltung der Gehirnkarten einwirkt. Es geht um den alten Streitpunkt, inwieweit erst das Verhalten das Gehirn formt oder ob das Gehirn das Verhalten bereits vorgibt. Wir haben an Sternmull-Embryonen untersucht, in welcher Zeitabfolge sich der Nasenstern und die mit seinen Tentakeln korrespondierenden Hirnareale entwickeln. Seltsamer als ein werdender Sternmull mit seinen gigantischen Händen und dem lappigen überdimensionalen Nasengebilde kann selbst ein Embryo kaum aussehen.

Modell für das Säugetiergehirn

Wie sich zeigt, entsteht der Nasenstern eher als seine Repräsentationsgebiete in der Hirnrinde. Im Prinzip könnte das Sinnesorgan also während bestimmter Entwicklungsphasen des Gehirns die Ausbildung der Hirnkarten beeinflussen. Hierzu beobachteten wir beim Embryo etwas Auffälliges: Die beiden elften Nasenanhänge sind zunächst wesentlich größer als die anderen Tentakel. Erst später kehren sich die Größenverhältnisse um. Hinzu kommt, dass an den elften Tentakeln die Eimer'schen Organe mitsamt ihren neuronalen Strukturen auch zuerst reifen – als würde diesen beiden Nasenlappen anfangs ein Vorsprung vor der Überzahl der anderen eingeräumt, die später viel länger auswachsen und jeder auch mehr Eimer'sche Organe erhalten. Ähnliches geschieht übrigens in der Netzhaut: Auch dort reift zuerst der gelbe Fleck, die Zone schärfsten Sehens.

Zu dem Entwicklungsvorsprung der elften Tentakel passt, dass die mit ihnen korrespondierenden Areale in der Hirnrinde ebenfalls als erste aktiv werden. Ob die elften Anhänge nun wirklich den für sie zuständigen Gehirnfeldern besonders viel Repräsentationsfläche verschaffen, indem sie dort in einem frühen Entwicklungsabschnitt für eine besonders hohe Aktivität sorgen, kann man bisher nur vermuten. Zumindest zum Sehsystem von Primaten erhielten Neurowissenschaftler recht deutliche Hinweise, dass es den während der Entwicklung aktivsten Sinneseingängen möglich ist, mehr Platz in der Hirnrinde zu belegen.

Doch junge Sternmulle benutzen die beiden elften Anhänge auch zum Milchsaugen. Möglicherweise unterstützt bei ihnen also ein Verhalten nach der Geburt die Anlage besonders großer Hirnfelder für die Zone schärfsten Tastens. An diesen Fragen arbeiten wir.

Am Sternmull erstaunt am meisten, wie solch ein absonderliches Tier überhaupt entstehen konnte. Wiederum könnten die Embryonen Anhaltspunkte zur Evolution dieser ungewöhnlichen Nase liefern. Die Strahlen wachsen nämlich nicht gleich nach vorn aus dem Körper heraus, sondern sie formen zunächst eine nach rückwärts weisende, in die seitlichen Gesichtspartien eingebettete zylindrische Struktur. Ganz allmählich beginnen sich die Tentakeln herauszuwölben, bis sie sich schließlich vom Gesicht lösen. Erst ungefähr zwei Wochen nach der Geburt biegen sie sich vor. Besaßen die Vorfahren des Sternmulls entlang der Schnauzenseite längliche, tastempfindliche Sinnesfelder? Vielleicht richteten diese Streifen sich dann immer mehr hoch.

Das ist keine reine Spekulation. Denn zwei andere Maulwurfsarten tragen flache, berührungsempfindliche kurze Sinnesstreifen an der Nasenoberseite. Beide leben im Westen Nordamerikas: der Pazifische Mull oder Küstenmull (*Scapanus orarius*, siehe kleines Bild links), und der Townsend's Mull *(Scapanus townsendii)*. Die Ähnlichkeit mit den Embryonen des Sternmulls ist frappant.

Weltfremd erscheint der Sternmull nur auf den ersten Blick. Bei näherem Hinsehen lassen sich an ihm allgemeine Prinzipien der Gehirnentwicklung erkennen. Nicht zuletzt kann dieses kleine Säugetier aufzeigen, wie bei der Gehirnreifung Anlage und Verhalten ineinander greifen. ■



Kenneth C. Catania *ist Assistenz-Professor für Biowissenschaften an der Vanderbilt-Universität in Nashville (US-Bundesstaat Tennessee). Er hat Zoologie studiert und in Neurowissenschaften promoviert.*

Literaturhinweise

Early Development of a Somatosensory Fovea: a Head Start in the Cortical Space Race. Von K. C. Catania in: Nature Neuroscience, Bd. 4, S. 353, April 2001.

Sensory Exotica: A World beyond Human Experience. Von Howard C. Hughes. MIT Press, 1999.

A Nose That Looks Like a Hand and Acts Like an Eye: The Unusual Mechanosensory System of the Star-Nosed Mole. Von K. C. Catania in: Journal of Comparative Physiology, Bd. 185, S. 367, 1999.

Weblinks bei ***www.spektrum.de*** *unter „Inhaltsverzeichnis"*

Taktlose Computer

Befreit vom Diktat einer zentralen Uhr, erbringen so genannte asynchrone Chips höhere Leistungen: Sie lassen jeden ihrer Schaltkreise laufen, so schnell er kann.

Von Ivan E. Sutherland und Jo Ebergen

Wie schnell ist Ihr PC? Die Antwort auf diese Frage wird in einer Einheit ausgedrückt, die früher eigentlich nur für Rundfunk- und Fernsehsender gebraucht wurde: Gigahertz oder Milliarden Schwingungen pro Sekunde. So schnell tickt ein Kristall-Schwingkreis, der als eine Zentraluhr dient, im Inneren des Computers. Alles, was ein Computer tut, findet in winzigen Schritten statt, deren jeder nur eine milliardstel Sekunde lang dauern darf. Eine einfache Datenübertragung benötigt möglicherweise nur einen Schritt, eine Addition zweier Zahlen schon mehrere. Anfang und Ende jeder dieser elementaren Operationen werden durch die zeitgebenden Impulse der Uhr bestimmt.

Die meisten modernen Computer arbeiten synchron, das heißt, es gibt nur einen einzigen Zeitgeber. Dessen Signale werden durch ein spezielles Verteilungssystem zu den einzelnen Bauteilen des Prozessorchips verbreitet, ähnlich wie der Schlag einer Trommel durch die Luft allen Soldaten zu Gehör gelangt und so ihren Marschrhythmus bestimmt. Dass alle Teile des Chips im gleichen Takt sind, erleichtert dem Konstrukteur die Arbeit; denn nach jedem Takt befindet sich der gesamte Computer in einem definierten und berechenbaren Zustand.

Die Verwendung einer zentralen Uhr ist jedoch nicht unproblematisch. Die Laufgeschwindigkeit der Zeitsignale konnte nämlich mit dem Anwachsen der Rechengeschwindigkeit nicht Schritt halten. In der Zeit, die ein Signal von einem Ende des Chips zum anderen braucht, könnte ein moderner Transistor bereits mehrere elementare Arbeitsschritte vollenden. Damit dieser Geschwindigkeitsvorteil unter einem zentralen Taktgeber nicht verloren geht, ist sorgfältige Planung erforderlich – und ziemlich viel elektrische Leistung, die sich in einer entsprechenden Wärmeentwicklung bemerkbar macht. Wäre da nicht eine Alternative besser?

Genau nach solchen Alternativen sucht unsere Forschungsgruppe in den Laboratorien der Firma Sun Microsystems. Wie andere Gruppen auf der ganzen Welt erforschen wir Computersysteme, in denen jeder Teil nach seinem eigenen Takt arbeiten kann, statt von dem Rhythmus einer zentralen Uhr abzuhängen. Solche Systeme nennt man asynchron. Jeder Teil eines asynchronen Systems kann seine Taktzeiten nach Bedarf verlängern oder verkürzen, ähnlich einem Wanderer, der je nach Gelände langsamer oder schneller läuft. Einige Pioniere des Computerzeitalters, darunter der Mathematiker Alan M. Turing, arbeiteten schon in den frühen 1950er Jahren Entwürfe für asynchrone Maschinen aus. Diese Ideen wurden jedoch bald zu Gunsten von synchronen Computern verworfen, denn der gemeinsame Takt erleichtert die Konstruktion ungemein.

Anarchie ist nützlich

Inzwischen erfreuen sich asynchrone Systeme wachsender Beliebtheit. Wissenschaftler von den Universitäten Manchester (England) und Tokio sowie vom California Institute of Technology (Caltech) in Pasadena haben Prototypen von Mikroprozessoren gebaut. Einige Mikrochips in dieser Technik sind bereits in der kommerziellen Massenproduktion: ein datengesteuerter Medienprozessor, das ist ein Chip zur Bearbeitung von Grafik-, Video- und Audiodateien, von dem japanischen Elektronikhersteller Sharp sowie ein Mikrocontroller für Funkrufempfänger von Philips. Auch in sonst synchron arbeitender Umgebung tauchen allmählich asynchrone Elemente auf: Der kürzlich von Sun eingeführte Prozessor UltraSPARC IIIi enthält ein paar asynchrone Schaltkreise, die in unserer Gruppe entwickelt wurden.

Nach unserer Überzeugung werden asynchrone Systeme immer populärer werden, sowie es gelingt, ihre Vorteile voll auszunutzen und ihre Bauweise zu vereinfachen. Es gibt schon beachtliche technische Erfolge zu verbuchen, aber der kommerzielle Erfolg lässt noch auf sich warten. Wir sind noch weit davon entfernt, die Möglichkeiten der Asynchronizität auszuschöpfen.

IN KÜRZE: Asynchrone Systeme

➤ Die meisten modernen Computer arbeiten synchron: Alle Vorgänge werden durch die Taktsignale eines winzigen Kristalloszillators in der Maschine koordiniert. Neuerdings beschäftigt sich die Forschung auch mit dem Bau asynchroner Systeme, die Daten ohne vorgegebenen Takt verarbeiten.

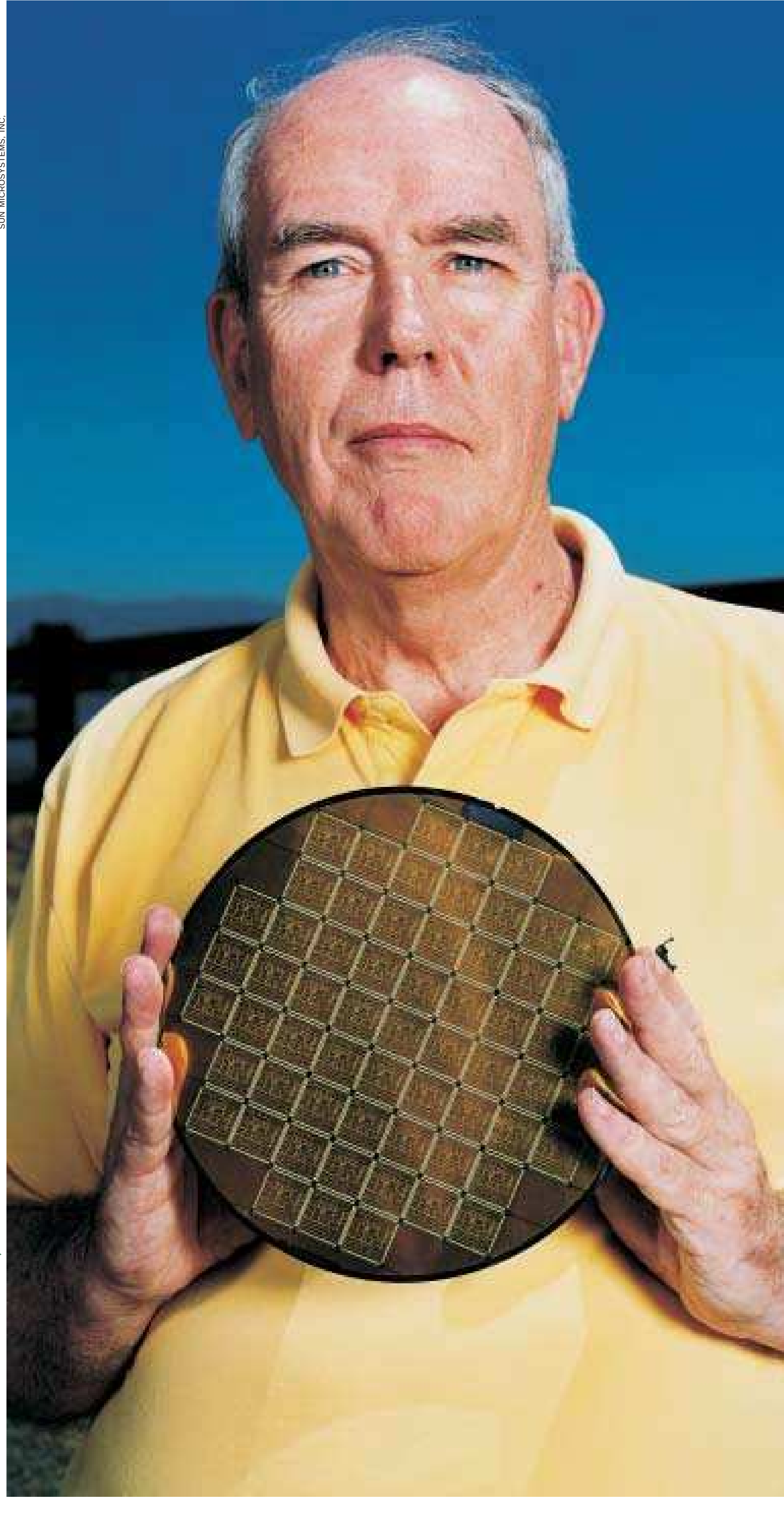
➤ In asynchronen Systemen wird ein geordneter Datenfluss statt durch den Taktgeber durch Schaltkreise zur lokalen Koordination hergestellt. Die zwei wichtigsten dieser Schaltkreise heißen Rendezvous und Arbiter.

➤ Die potenziellen Vorteile asynchroner Systeme bestehen in höherer Geschwindigkeit, niedrigerem Energieverbrauch und geringerer Störstrahlung. Sie werden sich mit der zunehmenden Komplexität integrierter Schaltkreise durchsetzen.

Worin besteht der potenzielle Nutzen asynchroner Systeme? Zunächst in der höheren Geschwindigkeit. In einem synchronen Chip muss die Taktfrequenz so gewählt werden, dass auch der langsamste unter allen denkbaren Elementarschritten in der Taktzeit vollendet wird. Wenn auch nur ein Schaltkreis eine volle Milliardstelsekunde für seinen Schritt braucht, kann der ganze Chip nicht schneller als mit einem Gigahertz betrieben werden. Auch wenn viele andere Schaltkreise im Chip wesentlich schneller fertig sind, müssen sie vor ihrer nächsten Aktion auf das zentrale Zeitzeichen warten. Im Gegensatz dazu nimmt sich ein Teil eines asynchronen Systems für jeden Vorgang genauso viel oder wenig Zeit, wie er tatsächlich benötigt. Komplizierte Operationen dauern länger als der Durchschnitt, einfache Schritte gehen schneller. Der nächste Schritt beginnt nicht erst, wenn das nächste Zeitzeichen eintrifft, sondern bereits wenn alle Vorbedingungen erfüllt sind. Dadurch hängt die Leistung des Gesamtsystems nur von der durchschnittlichen Bearbeitungsgeschwindigkeit ab und nicht von der des langsamsten Glieds.

Wann aber darf ein Bauteil losrechnen, wenn nicht auf Zeitzeichen? Woran merkt es, dass alle Vorbedingungen erfüllt, insbesondere alle Eingangsdaten beisammen sind? Dazu muss es sich mit seinen „Zulieferern" verständigen. Diese lokale Koordination verbraucht ebenfalls Zeit und Chipfläche. Wenn sich der Aufwand dafür in Grenzen hält, zum Beispiel weil die Zulieferer in unmittelbarer Nachbarschaft sitzen, kann ein asynchrones System im Durchschnitt schneller sein als ein getaktetes. Am deutlichsten kommt dieser Vorteil zum Tragen, wenn sehr unterschiedliche Bauteile auf einem Chip vereinigt sind und die langsamsten unter ihnen selten verwendet werden.

Die asynchrone Bauweise kann auch den Stromverbrauch eines Chips reduzieren. In der heutigen Generation großer, schneller synchroner Chips nehmen die Schaltkreise zur Verbreitung des Zeitsignals einen gehörigen Teil der Chipfläche ein und verbrauchen bis zu dreißig Prozent der elektrischen Ge-



SUN MICROSYSTEMS, INC.

Ivan E. Sutherland, einer der Autoren dieses Artikels, gilt als der Vater der Computergrafik. Heute ist er Leiter einer Forschungsgruppe in den Laboratorien von Sun Microsystems. Der Silizium-Wafer in seiner Hand enthält Prozessorchips des Typs UltraSPARC IIIi, in denen auch einige asynchrone Schaltkreise verwendet werden.

samtleistung. Da die Uhr zudem im Dauerbetrieb läuft, erzeugt sie auf jeden Fall Wärme, ob nun der Chip nützliche Arbeit leistet oder nicht.

In asynchronen Systemen verbrauchen ruhende Elemente des Chips praktisch keine Energie. Das ist vor allem für Geräte im Batteriebetrieb eine wertvolle Eigenschaft, zahlt sich aber auch bei größeren Systemen aus, da sich der Kühlungsaufwand zum Schutz vor Überhitzung verringert. Eine Energieeinsparung ergibt sich in dem Ausmaß, in dem Teile des Systems nur sporadisch aktiv sind. So ist zum Beispiel eine Komponente für Gleitkomma-Arithmetik zwar in den meisten Computern vorhanden, aber über lange Zeiten unbeschäftigt.

Ein weiterer Vorteil: Asynchrone Systeme erzeugen weniger Radiowelleninterferenzen als synchrone. Letztere senden ein starkes Radiosignal mit der Taktfrequenz und deren Vielfachen aus. Damit Mobiltelefone, Fernseher und Flugzeug-Navigationssysteme, die auf derselben Frequenz arbeiten, nicht gestört werden, muss die Strahlung abgeschirmt oder – im Flugzeug – der Computer sogar ausgeschaltet werden. Dagegen verteilen die taktlosen Computerchips ihre Strahlung über einen breiten Frequenzbereich, sodass auf jede einzelne Frequenz weit weniger störende Energie entfällt.

Sowie synchrone Computer mit verschiedenen Takten zur Lösung einer Aufgabe zusammengeschaltet werden, ist die entstehende Verbundmaschine (ein Cluster, siehe Spektrum der Wissenschaft 03/2002, S. 88) „von Natur aus“ asynchron und erfordert entsprechende Techniken. Um etwa Daten aus einem System mit einem Takt auf einen Computer mit einem anderen Takt zu übertragen, können sich Arbeitsprinzipien der asynchronen Chips nützlich machen.

Ein asynchrones System zu bauen ist zwar schwer; aber wenn man es einmal beherrscht, gewinnt man ganz neue Freiheiten. Die Abhängigkeiten unter den einzelnen Bauteilen müssen loser werden, damit ein asynchroner Chip überhaupt funktioniert; dadurch wird es aber auch einfacher, irgendein Bauteil durch eine schnellere Version zu ersetzen und so das ganze System zu beschleunigen. Will man hingegen ein getaktetes System schneller machen, muss man in der Regel jedes Einzelteil entsprechend verbessern.

Anarchie ist machbar

Um zu beschreiben, wie asynchrone Systeme funktionieren, verwenden wir gern das Bild von der Eimerkette. Ein getaktetes System ist wie eine Kette von Arbeitern, deren jeder nach dem Ticktack-Rhythmus der Uhr einen Eimer weitergibt oder annimmt. Bei „tick“ gibt jeder seinen Eimer an den Nachfolger in der Kette weiter, bei „tack“ nimmt er vom Vorgänger einen an (Kasten rechts). Der Rhythmus der Eimerkette wird bestimmt durch die Zeit, die der Langsamste braucht, um den schwersten Eimer zu bewegen. Selbst wenn fast alle Eimer leicht sind, so muss doch jeder in der Kette auf das nächste Zeitzeichen warten, bevor er den Eimer weitergeben kann.

Eine asynchrone Eimerkette wird durch lokale Kooperation und nicht durch eine universelle Uhr bestimmt. Wer gerade einen Eimer hält, gibt ihn an seinen Nachfolger weiter, sobald dieser die Hände frei hat. Dabei kann es passieren, dass einer auf den anderen warten muss. Wenn die meisten Eimer leicht sind, können sie recht schnell durch die Kette wandern. Wenn es gerade nichts zu transportieren gibt, kann sich jeder auch eine kleine Ruhepause gönnen. Ein langsames Glied in der Kette hält zwar immer noch den ganzen Betrieb auf; aber wenn man nur dieses eine Glied austauscht, läuft das System wieder zu seiner optimalen Geschwindigkeit auf.

In einem Computer entspricht der Eimerkette eine so genannte Pipeline. Mit diesem – wenig treffenden – Wort bezeichnet man eine Einrichtung zur überlappten Befehlsausführung. Die Ausführung jeder Anweisung (Beispiel: „Addiere *A* und *B* und schreibe das Ergebnis nach *C*“) wird in elementare Teilschritte zerlegt: im Beispiel die Anweisung aus dem Speicher holen, sie dekodieren, die Zahlen aus den Adressen *A* und *B* im Speicher holen, die Addition ausführen und die Summe in der Speicheradresse *C* abspeichern. Jeder Teilschritt (*stage*) entspricht einem Glied in der Eimerkette. Insbesondere wird jeder Teilschritt von einem speziellen Bauteil ausgeführt; sowie dieses mit seinem Anteil an der Arbeit fertig ist, kann es sich bereits dem nächsten Befehl zuwenden (Spektrum der Wissenschaft 05/2000, S. 26).

In einer getakteten Pipeline verbraucht jeder Teilschritt die gleiche Zeit, unabhängig von der Art der Aufgabe und der Größe der Zahlen. Eins und eins zusammenzuzählen dauert genauso lange wie die Addition von zwei dreißigstelligen Binärzahlen. Dagegen kann in einer asynchronen Pipeline die Dauer jedes Vorgangs von der Art der Operation, der Größe der Zahlen und dem Aufwand für den Speicherzugriff abhängen, so wie in der Eimerkette die leichten Eimer schneller wandern können als die schweren.

Bei asynchronen Systemen müssen sich mangels Zentraluhr die Schaltkreise untereinander („lokal“) koordinieren. In der Eimerkette muss sich jeder vor seiner Aktion vergewissern, dass sein Vorgänger einen Eimer abzugeben und sein Nachfolger die Hände frei hat. Entsprechend müssen die Schaltkreise einander Meldungen über ihren Zustand schicken. Ein Schaltkreis kann erst dann mit seiner Arbeit beginnen, wenn er selbst frei ist und seine Vorgänger ihre Arbeit für beendet erklären. Diese Informationen müssen durch eigens eingerichtete Schaltkreise verarbeitet werden. Die wichtigsten unter ihnen heißen „Rendezvous“ und „Arbiter“.

Ein Rendezvous-Element gibt an, wann das letzte von zwei oder mehr Eingangselementen bei dem Bauteil für einen speziellen Teilschritt eingetroffen



Eimerketten

Kann ein Bauteil dem anderen das Wasser reichen?

Ein nützliches Bild zur Beschreibung des Datenflusses in einem Computer ist die Eimerkette. Ein synchrones (herkömmliches) Computersystem entspricht dem Fall, dass jede Person nach dem Rhythmus einer Uhr Eimer weitergibt und entgegennimmt. Macht die Uhr „tick“, gibt jeder einen Eimer an den Nächsten in der Reihe weiter (oben). Bei „tack“ nimmt jeder den vom Vorgänger weitergegebenen Eimer auf (Mitte). Ein asynchrones System funktioniert hingegen wie eine ganz normale Eimerkette: Jeder reicht seinen Eimer an den Nachfolger weiter, sobald der die Hände frei hat (unten).

synchrones System

asynchrones System

BRYAN CHRISTIE DESIGN

ist. Zum Beispiel gibt ein Rendezvous-Element einem Schaltkreis, der eine Division auszuführen hat, erst dann das Startsignal, wenn an dessen Eingängen sowohl der Dividend (zum Beispiel 16) als auch der Divisor (sagen wir 2) anliegen. Daraufhin wird er die Division ausführen (mit dem Ergebnis 8) und dem nächsten Rendezvous-Schaltkreis mitteilen, wenn er damit fertig ist.

Eine Art von Rendezvous-Schaltkreis wird Muller-C-Element genannt, nach David Muller, einem mittlerweile emeritierten Professor der Universität von Illinois in Urbana-Champaign. Ein Muller-C-Element enthält zwei Eingänge und einen Ausgang (Kasten nächste Doppelseite). Wenn beide Eingänge den Wert 1 haben, dann hat auch der Ausgang diesen Wert. Sind beide Eingänge 0, so gilt dies auch für den Ausgang. In allen anderen Fällen bleibt das Ausgangssignal unverändert. Damit das Muller-C-Element als Rendezvous-Schaltkreis arbeiten kann, muss der Zustand seiner Eingänge so lange unverändert bleiben, bis das Element geschaltet hat und am Ausgang der zugehörige Zustand anliegt. Eine Kette von Muller-C-Elementen kann den Datenfluss entlang einer elektronischen Eimerkette regeln.

Unsere Forschungsgruppe hat vor kurzem einen neuartigen Rendezvous-Schaltkreis namens GasP vorgestellt. Er ist ein Abkömmling einer früheren Familie von Schaltkreisen, die auf Charles E. Molnar, unseren verstorbenen Kollegen von Sun Microsystems, zurückgeht. Molnar gab seiner Kreation den Namen asP*, was „asynchrones symmetrisches Puls-Protokoll“ bedeutet (der Stern steht für „doppeltes P“). Wir fügten noch das G hinzu, weil einem tatsächlich die Luft wegbleiben kann (englisch *gasp*), wenn man sieht, wie schnell die Schaltkreise sind. Wir fanden, dass GasP-Module in Geschwindigkeit und Energieverbrauch den Muller-C-Elementen gleichwertig sind, jedoch besser zu normalen Daten-Signalspeichern passen und in komplexen Chipkonstruktionen weitaus vielseitiger einsetzbar sind.

Buridans Esel

Ein Arbiter erfüllt eine weitere für asynchrone Computer wichtige Aufgabe. Er ist wie ein Verkehrspolizist an einer Kreuzung, der entscheidet, welches Auto als nächstes durchfahren darf. Liegt nur eine Anforderung vor, so gibt der Arbiter sofort den entsprechenden Vorgang frei und stellt später eingehende Anforderungen zurück, bis die erste erledigt ist. Gehen jedoch zwei Anforderungen gleichzeitig ein, so muss der Arbiter (daher der Name, „Schiedsrichter“) entscheiden, welcher er zuerst stattgeben soll.

Typische Anwendung ist der gleichzeitige Zugriff zweier Prozessoren auf ▶

Süddeutsche Zeitung

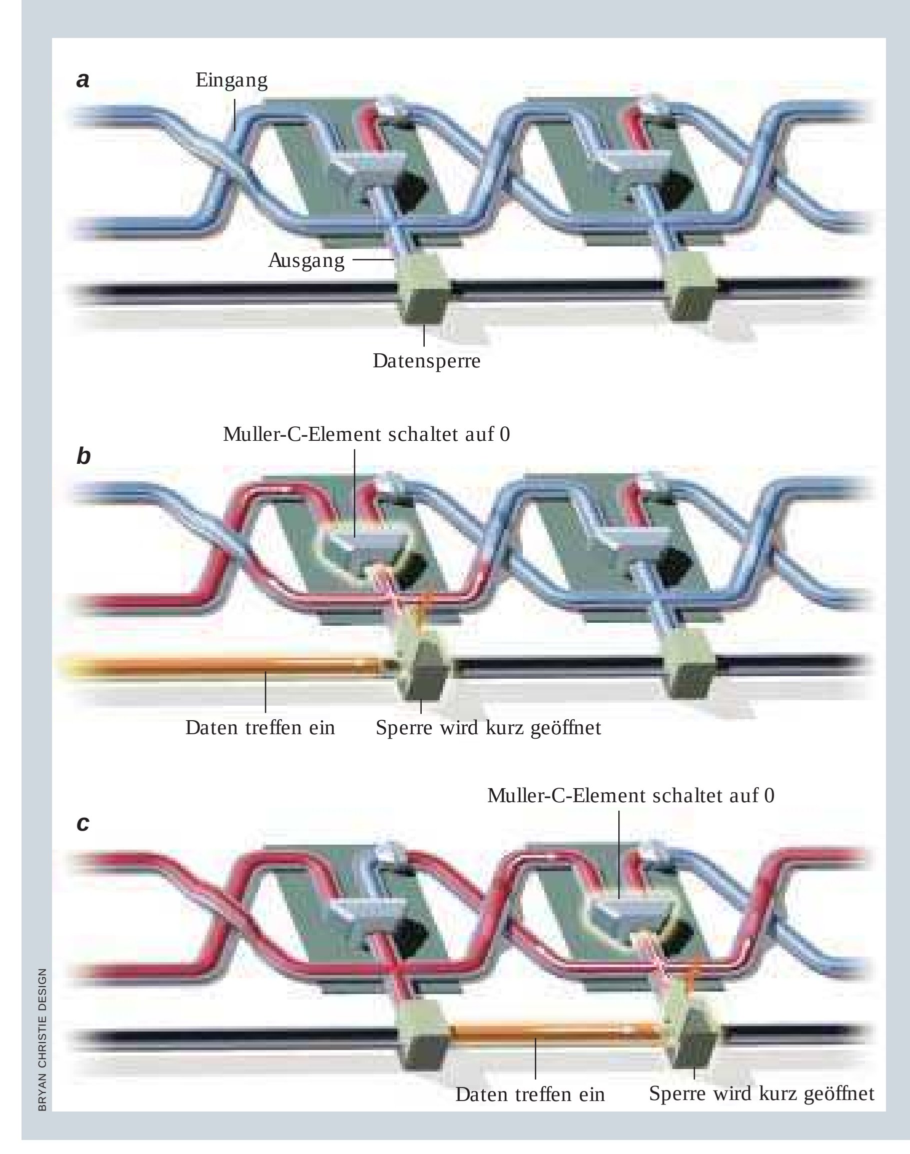
den gemeinsam genutzten Speicher. Der Arbiter bringt diese Zugriffe in eine Reihenfolge, sodass zu jedem Zeitpunkt nur ein Prozessor Zugang hat. Damit wird garantiert, dass nie zwei Aktionen gleichzeitig im Gange sind, ebenso wie der Verkehrspolizist Unfälle verhindert, indem er an einer Kreuzung niemals zwei Autos auf Kollisionskurs fahren lässt.

Arbiter-Schaltkreise erfüllen perfekt die Bedingung, zu einem Zeitpunkt nie mehr als einer Anforderung stattzugeben. Allerdings ist es unmöglich, einen Schaltkreis zu bauen, der in jedem Konfliktfall in einer festgelegten Zeitspanne zu einer Entscheidung kommt. Heutige Arbiter-Schaltkreise fällen ihre Entscheidungen sehr schnell: im Durchschnitt innerhalb von ein paar Hundert Picosekunden (billionstel Sekunden). Treffen die Anfragen jedoch sehr dicht nacheinander ein, benötigen sie gelegentlich doppelt so lange, in sehr seltenen Fällen sogar die zehnfache Zeit.

Ein Arbiter befindet sich in diesem Fall in dem Dilemma von Buridans Esel. Nach einer Parabel, die Buridan, einem französischen Philosophen des 14. Jahrhunderts, zugeschrieben wird, verhungert ein Esel, der genau in der Mitte zwischen zwei Heuhaufen steht, da er unfähig ist zu entscheiden, von welchem Heuhaufen er fressen soll. Etwas weniger dramatisch kennen wir das aus dem Alltag, etwa wenn zwei Leute, die gleichzeitig eine Tür erreichen, sich nicht einigen können, wer als Erster durchgeht. Dabei kommt es auf die Reihenfolge überhaupt nicht an. Buridans Esel würde vom linken Heuhaufen so gut satt werden wie vom rechten; er muss eben nur die Pattsituation aufbrechen.

Genau das tut ein Arbiter-Schaltkreis. Wie eine Flip-Flop-Schaltung hat er zwei stabile Zustände, die den beiden Entscheidungsmöglichkeiten entsprechen. Man kann sie sich als die Nordsee und das Mittelmeer vorstellen. Jede Anfrage an den Arbiter drückt den Schaltkreis in Richtung des einen oder des anderen stabilen Zustands, so wie ein Hagelkorn, das auf die Alpen fällt, entweder nord- oder südwärts rollt und am Ende in einem der Meere aufgeht. Zwischen diesen stabilen Zuständen muss es jedoch eine metastabile Trennlinie geben. Fällt ein Hagelkorn direkt auf diese Wasserscheide, kann es noch einen Moment auf dem Grat balancieren, bevor es endgültig zum Mittelmeer oder zur Nordsee hinabfällt. Treffen zwei Anfragen im Abstand von wenigen Picosekunden beim Arbiter-Schaltkreis ein, so verharrt er mög-

Rendezvous-Schaltkreise



Geregelter Datenverkehr –

Die links gezeigte Pipeline (untere Röhre in jedem Teilbild) erfüllt eine sehr einfache Aufgabe: Daten von links nach rechts zu transportieren. Die kleinen Kästchen nehmen eine Dateneinheit von links entgegen und reichen sie zum rechten Nachbarkästchen weiter. Im Prinzip könnten auf dem Streckenabschnitt zwischen zwei Kästchen irgendwelche Rechenoperationen mit den Daten stattfinden. Das vereinfachte Beispiel dient zur Demonstration der lokalen Koordination.

Das Prinzip ist wie bei der Eisenbahn: Eine Aktion (Zugfahrt) findet nicht unbedingt dann statt, wenn eine Zentraluhr das per Fahrplan vorschreibt, sondern genau dann, wenn sowohl der aktuelle Streckenabschnitt besetzt als auch der vorausliegende Streckenabschnitt frei ist. Die Feststellung, dass eine Aktion stattfinden soll (die „Freischaltung des Fahrsignals“), muss sehr schnell und unaufwendig ablaufen. Daher ist das Muller-C-Element, das diese Feststellung trifft, sehr einfach gebaut. Der Datenfluss wird durch eine Kette solcher Elemente geregelt.

Jedes Muller-C-Element hat zwei Eingänge und einen Ausgang. Der Ausgang nimmt den Zustand 0 an, wenn beide Eingänge im Zustand 0 sind; sind beide Eingänge 1, so ändert sich auch der Ausgang zu 1. (In der Abbildung ist der Zustand 1 blau und der Zustand 0 rot dargestellt.) Zu Anfang sind alle Ausgänge im Zustand 1. Der Ausgang jedes

licherweise ebenfalls kurze Zeit in diesem metastabilen Zustand, bevor er das Patt aufbricht und einen seiner stabilen Zustände erreicht.

Eine Computerflotte namens Fleet

Neulinge im Geschäft der Arbiter-Konstruktion versuchen häufig, selbst diese nur gelegentlich vorkommenden Verzögerungen mit scharfsinnigen Tricks zu vermeiden. Ein beliebter Fehler ist es, mit Hilfe eines zusätzlichen Schaltkreises das Hängenbleiben in einem metastabilen Zustand zu erkennen und daraufhin den Arbiter in Richtung einer bestimmten Entscheidung zu zwingen. Das ist so, als wollte man Buridans Esel darauf dressieren, dass er, wenn es schwierig wird, stets vom linken Heuhaufen frisst. Damit hat das arme Tier jedoch drei Wahlmöglichkeiten statt zwei: links fressen, rechts fressen oder die Situation als schwierig erkennen und daher links fressen. Auch ein gut dressierter Esel würde verhungern, wenn er sich zwischen den letzten beiden Möglichkeiten nicht entscheiden kann. Oder, um im geografischen Bild zu bleiben: Man kann die Wasserscheide mit einer Schaufel etwas verlegen, aber nicht abschaffen. Die Metastabilität ist unvermeidlich, jedoch können gut konstruierte Arbiter-Schaltkreise sicherstellen, dass praktisch alle Verzögerungen sehr kurz sind. Ein moderner Arbiter-Schaltkreis hat eine durchschnittliche Schaltzeit von 100 Picosekunden. Verzögerungen von 400 Picosekunden sind seltener als einmal in zehn Stunden Betriebszeit zu erwarten. Die Wahrscheinlichkeit von Verzögerungen nimmt exponentiell mit deren Länge ab: Auf eine Denkpause von 800 Picosekunden müsste man im Durchschnitt eine Milliarde Jahre warten.

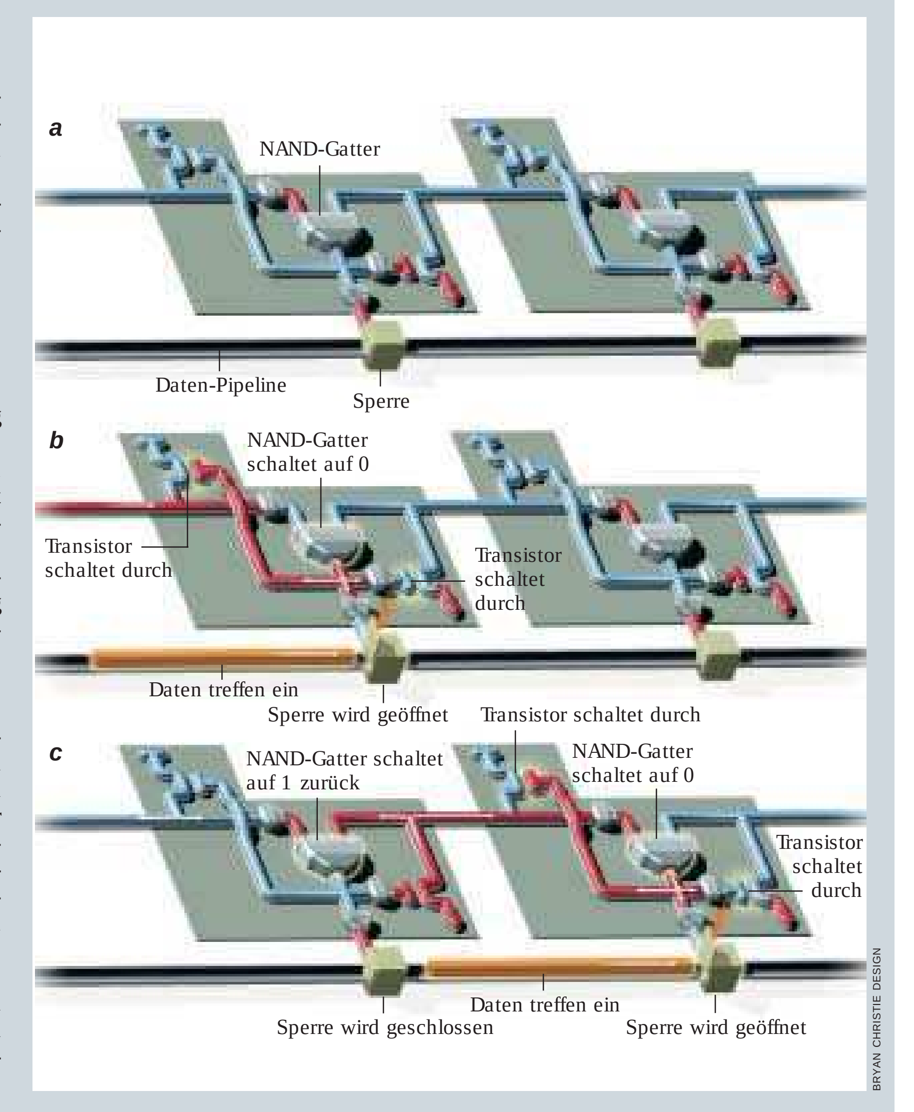
Unsere Gruppe bei Sun Microsystems konzentriert sich auf schnelle asynchrone Systeme. Dabei haben wir gelernt, dass Geschwindigkeit häufig durch Einfachheit der Konstruktion zu Stande kommt. Anfänglich wollten wir eine Pipeline mit zwei entgegengesetzten Datenflüssen bauen – wie zwei parallele Eimerketten, die in entgegengesetzten Richtungen arbeiten. Es würden sich also lauter Paare von „Wassertransporteuren“ von Angesicht zu Angesicht gegenüber stehen; jeder empfängt seine Eimer vom linken Nachbarn und reicht sie zum rechten Nachbarn weiter; gleichzeitig soll aber das jeweilige Gegenüber auf den aktuellen Eimer zugreifen können.

Diese sehr schwere Aufgabe ist nur lösbar, wenn an jedem Glied der doppel- ▶

auch bei Verspätung

Muller-C-Elements ist über einen Inverter (Zustandsumkehrer oder NICHT-Gatter) mit einem Eingang des linken Nachbarelements verbunden, sodass anfangs die beiden Eingänge aller Muller-C-Elemente verschiedene Werte haben, der linke 1 und der rechte 0 (*a*). Wenn der linke Eingang von 1 auf 0 schaltet (*b*), zeigt das an, dass der linke „Streckenabschnitt“ besetzt ist – das heißt, es sind Daten angekommen. Da die Eingänge des Muller-C-Elements nun gleich sind, schaltet der Ausgang auf 0. Diese Änderung bewirkt dreierlei: Die zu steuernde Aktion – in unserem Beispiel die Datenweiterleitung – findet statt, da die Datensperre kurzzeitig geöffnet wird; über die Leitung nach links wird der vorhergehende Streckenabschnitt freigeschaltet; und die Leitung nach rechts meldet den neuen Streckenabschnitt als besetzt (*c*).

Ein GasP-Modul (rechts) ist ebenfalls ein Rendezvous-Element für asynchrone Daten-Pipelines. (Das große P in GasP stammt vom Namen einer früheren Schaltkreisfamilie.) Wie bei der Kette der Muller-C-Elemente löst ein einziges Ausgangssignal nicht nur die jeweilige Aktion aus, sondern meldet den vorhergehenden Teil der Pipeline als frei und den aktuellen als besetzt. An die Stelle des Muller-C-Elements tritt ein NAND-Gatter, dessen Ausgang genau dann 0 ist, wenn beide Eingänge 1 sind. Zusätzlich sind noch zwei Transistoren in den Schaltkreis eingefügt.



ten Kette ein Arbiter den Zugriff auf den aktuellen Eimer regelt. Für die Forschung erwies sich dieses Projekt als sehr nützlich; es gab eine Menge zu lernen über Koordination und Datenverkehrsregelung, und wir bauten auch erste Testchips, um die Zuverlässigkeit unserer Arbiter-Schaltkreise zu demonstrieren.

Vor kurzem stürzten wir uns auf ein neues Forschungsvorhaben: eine Datenverarbeitungsstruktur namens „Fleet“ („Flotte“). Den Namen haben wir nicht nur gewählt, weil er sich auf „speed“ reimt, sondern weil wir die Recheneinheiten als Schiffe verstehen, die innerhalb eines Flottenverbandes eigenständig ihre jeweilige Aufgabe erfüllen. Das System Fleet koordiniert die Aktionen der Flotte, indem es über ein asynchrones Netzwerk Daten von Schiff zu Schiff schickt.

Unsere Arbeit am Projekt Fleet führte zu einer Reihe von Entdeckungen. Wir wollten Schnelligkeit, und daraufhin konstruierten wir die ersten GasP-Schaltkreise. Wir wollten bestimmte Daten von einer Pipeline in die andere lenken, wie Autos an einem Autobahnkreuz, und daraufhin entwickelten wir eine größere Familie von GasP-Schaltkreisen, die wie ein dichtes Autobahnnetz wirken. Auf ihnen erreicht die Datenübertragung die doppelte Geschwindigkeit wie in getakteten Systemen.

Zur Messung dieser Geschwindigkeit schalten wir unsere Elemente zu einem Ring zusammen, auf dem unsere Daten laufen wie auf der Autorennbahn. Die Zeit für eine vollständige Runde ist um einiges einfacher zu messen als die viel kürzere Zeit, die der Durchlauf durch ein Element benötigt.

Allmählich gelangen von uns gebaute Chips auch in kommerzielle Computerprodukte von Sun. Der Prozessorchip UltraSPARC IIIi enthält asynchrone Zwischenspeicher, die Daten aus Speicherchips entgegennehmen. Dies ist die einfachste und schnellste Technik, um die unterschiedlichen Signallaufzeiten zu und von den Speicherchips zu kompensieren, die verschieden weit vom Prozessor entfernt liegen.

Mittlerweile wächst die Zuversicht der Produktdesigner von Sun, dass asynchrone Elemente zu vernünftigen Kosten herstellbar und überprüfbar sind, zuverlässig funktionieren und wesentliche Vorteile bieten: Geschwindigkeit, Flexibilität, Energieersparnis und geringere Störstrahlung.

Sun ist mit diesem Forschungsprogramm keineswegs allein. Eine Gruppe bei Philips in den Niederlanden hat ein asynchrones Fehlerkorrektur-Bauteil für einen digitalen Kompaktkassettenspieler entwickelt sowie eine asynchrone Version eines populären Mikrocontrollers für Funkrufempfänger. Energieverbrauch und Störstrahlung sind so gering, dass neben dem Computer (dem Mikrocontroller) auch ein empfindlicher Radioempfänger in dem winzigen Gerät Platz findet. Dieser Erfolg ist maßgeblich auf die Verwendung einer Programmiersprache namens Tangram zurückzuführen, welche die Hardwareplanung wesentlich vereinfacht und damit auch die Produktentwicklung beschleunigt.

Außerdem zeigen die Experimente, die in Manchester, am Caltech und bei Philips durchgeführt wurden, dass asynchrone Mikroprozessoren im Prinzip mit ihren getakteten Kollegen kompatibel sind. Sie können auch an Peripheriegeräte ohne spezielle Programme oder Schnittstellenadapter angeschlossen werden.

Herausforderung asynchrone Zukunft

Die Befreiung vom Diktat der Zentraluhr eröffnet ungeahnte Möglichkeiten – und bereitet ungeahnte Probleme. Da jeder Teil des Systems seinen eigenen, unvorhersehbaren Takt hat und alle zugleich aktiv sind, können deren Aktionen in irgendeiner Reihenfolge stattfinden. Diese Aktionen mitsamt möglichen Kollisionen – etwa konkurrierenden Speicherzugriffen – sind ungefähr so schwierig zu überblicken und zu beherrschen wie ein Schulhof voller Kinder. Mit der Zahl der aktiven Elemente wächst die Anzahl der möglichen Systemzustände exponentiell an: die so genannte Zustandsexplosion. Wie kann man dieses Chaos bewältigen?

Einige neue Theorien schaffen Abhilfe. Man braucht sich nicht um alle möglichen Abfolgen von Vorgängen zu kümmern, wenn man für das Kommunikationsverhalten jedes Schaltkreises gewisse Einschränkungen festlegt. Auf dem Schulhof entspräche das der Vermeidung von Unfällen, indem man den Kindern gewisse potenziell gefährliche Verhaltensweisen verbietet.

Noch leidet die Technik der asynchronen Computer unter den Kinderkrankheiten einer jungen Technologie: Es gibt keine ausgereifte Design-Software, keine allgemein akzeptierten Prüfverfahren und zu wenig ausgebildete Fachleute. Eine ständig wachsende Forschergemeinschaft macht zwar gute Fortschritte, doch das Gesamt-Investitionsvolumen ist äußerst mager im Vergleich zu dem, was für getaktete Systeme aufgewendet wird. Wir sind jedoch davon überzeugt, dass der unaufhaltsame Fortschritt bei Geschwindigkeit und Komplexität von integrierten Schaltkreisen der asynchronen Technik einen unwiderstehlichen Vorteil verschaffen wird. Ob dieser Durchbruch eher in einem großen Konzern oder in einem jungen Unternehmen mit unkonventionellen Ideen stattfinden wird, ist noch nicht abzusehen.

Der Trend ist jedoch unausweichlich: In den kommenden Jahrzehnten werden asynchrone Bauelemente die Hauptrolle spielen. Damit wird es auch keine einfache Antwort mehr auf die Frage geben: Wie schnell ist Ihr PC? ■

Ivan E. Sutherland *(Mitte links) ist als Pionier der Computergrafik bekannt: Er entwickelte 1963 das interaktive Grafikprogramm Sketchpad. Zur Konstruktion asynchroner Schaltkreise kam er Mitte der 1960er Jahre, als er an der Harvard-Universität einen Grafikprozessor baute. Heute ist er Vizepräsident und Fellow bei Sun Microsystems und leitet die Gruppe für asynchrone Konstruktion in den Laboratorien der Firma.* **Jo Ebergen** *(Mitte rechts) erlag der Faszination asynchroner Konstruktion vor zwanzig Jahren während eines dreimonatigen Schnupperaufenthalts bei Charles L. Seitz vom Caltech. In der Folge lehrte er an der Technischen Universität Eindhoven (Niederlande) und an der Universität von Waterloo (Kanada), bis er sich schließlich im Sommer 1996 der Gruppe für asynchrone Konstruktion von Sun anschloss.*



Literaturhinweise

Principles of Asynchronous Circuit Design: A Systems Perspective. Von Jens Sparsø und Steve Furber (Hg.). Kluwer, 2001.

Asynchronous Circuits and Systems. Sonderheft von Proceedings of the IEEE, Februar 1999.

Micropipelines: The Turing Award Lecture. Von Ivan E. Sutherland in: Communications of the ACM, Bd. 32, Nr. 6, S. 720, Juni 1989.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei **www.spektrum.de** *unter der Rubrik „Inhaltsverzeichnis“.*



Metallkugeln schweben durch Wirbelströme

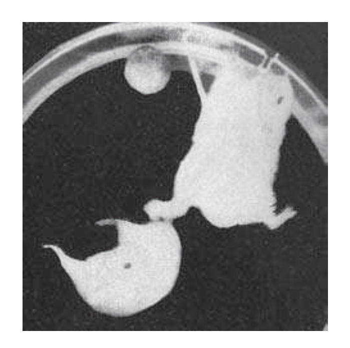
Schon früher war es gelungen, Metallkörper zum freien Schweben im Raum zu bringen, indem in ihnen von einer wechselstromdurchflossenen Spule aus Wirbelströme induziert wurden. Kürzlich haben amerikanische Forscher diese Methode in bemerkenswerter Weise ausgebaut. Sie bringen Kugeln aus Aluminium, Molybdän oder Kupfer bis zu 150 g Gewicht zum freien Schweben zwischen zwei Spulen, die von einem Wechselstrom durchflossen werden. Die hierbei den Metallkugeln durch Induktion zugeführte Energie ist so hoch, daß sie … sogar schmelzen. … Dies kann praktisch wichtig werden, da es so möglich ist, ein Metall ohne jede Berührung mit anderen Stoffen … zu schmelzen und so die geringste Verunreinigung auszuschließen. *(Kosmos, 48. Jg., Heft 12, S. 575, 1952)*

Die Sprache der Fische

Im Ozeanographischen Institut in Massachusetts in den USA sammeln sich einzigartige Schallplatten. Man hat Mikrophone ins Meer hinabgelassen und die Sprache der Fische festgehalten. … Zu den größten Krakeelern gehören die Umberfische. Sie führen regelrechte Trommelkonzerte aus. … Einige Fischarten verständigen sich durch Knirschen mit ihren Rachenzähnen, z. B. der Schweinsfisch. Der größte Lärmmacher … ist wohl der Croaker. Er vermag ein rollendes Geräusch von Trommelstößen von sich zu geben, das mit dem eines Preßluftbohrers verglichen werden kann. *(Westermanns Monatshefte, 93. Jg., Heft 9, S. 84, 1952/53)*

Mäuse schwerelos im Raum

Die Frage, wie ein Organismus auf das Aufhören der Gravitationswirkung antwortet, ist von besonderer Bedeutung für spätere Weltraumfahrt-Versuche. Das soeben freigegebene Photo, in 62 Kilometer Höhe aufgenommen, … zeigt zwei weiße Mäuse, die sich in zwei hintereinander befindlichen Plexiglas-Trommeln befanden. Zwei Minuten lang war die Erdanziehung gleich Null. Eine der schwerelos gewordenen Mäuse schwebt hilflos im Leeren; die andere aber hat an einer vorspringenden Kante Halt gefunden, konnte so … ihr Gleichgewicht … aufrecht erhalten. Die Mäuse zeigten übrigens keinerlei anormale Erscheinungen … Das US-Luftfahrt-Forschungs- und Entwicklungs-Kommando zieht aus diesen Versuchen den Schluß, daß ein Mensch, für den in einem Raketenflugzeug ausreichende Sicherungen vorhanden sind, „seine normalen Funktionen für kurze Zeiten der Schwerelosigkeit behält und damit auch in der Lage bleibt, die für die Führung eines Flugzeuges notwendigen Maßnahmen vorzunehmen.“ *(Orion, 7. Jg., Nr. 23/24, Dezemberheft 1952)*

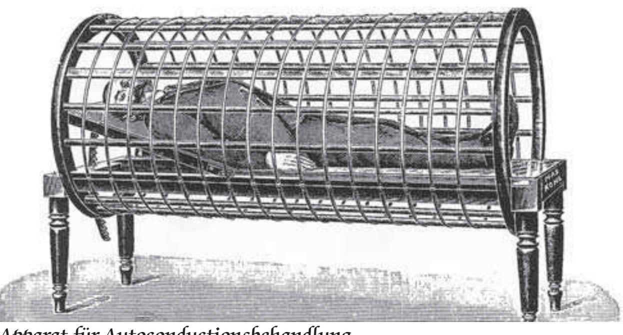


Mäuse im Kampf mit der Schwerelosigkeit

1902

Elektrotherapeutik mit Hochfrequenzströmen

Am häufigsten kommt zur Anwendung die Methode der Autoconduction. Bei derselben werden die Hochfrequenzströme in einer großen Spirale aus Kupferdraht, einem sogenannten Solenoide, erzeugt. Das Solenoid ist so ausgelegt, daß ein erwachsener Mensch bequem in demselben Platz findet. Der Patient befindet sich in einem elektrischen Felde, wodurch in seinem Körper elektrische Ströme hervorgerufen werden, ohne daß er mit einem Punkte der Leitung in Berührung kommt. … Die Sitzungen werden täglich in einer Dauer von 3 bis 10 Minuten vorgenommen. Bei Auftreten von Beschwerden muß die Dauer der Sitzung abgekürzt werden. Die Folgen dieser Behandlung sind: Rückkehr des Schlafes, Hebung des Kräftezustandes und der Lebensenergie, Besserung des Appetites u.s.w. *(Stein der Weisen, Bd. 28, S. 380, 1902)*



Apparat für Autoconductionsbehandlung

Übertragung des Milzbrandes durch Rohhäute

Die Übertragung des Milzbrandgiftes erfolgt durch Berührung oder durch den Staub, welcher beim Sortieren, Einpacken und Verladen der Häute und Felle sich entwickelt. In der Regel gelangt der Krankheitsstoff durch Hautabschürfungen … in den menschlichen Körper; auch in Mund und Nase kann er eindringen. Durch Verunreinigungen von Futter und Streu mit den von Rohhäuten stammenden Haaren, durch Einstreuen der zum Gerben benutzten Lohe in Ställe, sowie infolge der Wartung von Tieren durch Personen, welche mit der Verarbeitung oder Verpackung der Häute beschäftigt waren, kann der Milzbrand auf Vieh übertragen werden. Selbst die Verwendung von Gerbereiabfällen und Kehricht als Dungmittel, sowie das Einlegen der Rohhäute in Gewässer kann zur Verschleppung des Milzbrandgiftes führen. *(Gewerbeblatt für das Grossherzogthum Hessen, 65. Jg., Nr. 50, S. 601, 1902)*

Flüssige Luft im Tank?

Der Transport der flüssigen Luft erfolgt in Flaschen. Es sind doppelwandige Glaskannen, deren Zwischenraum luftleer ausgepumpt ist, um Wärmeleitungen zu verhindern und deren Wände versilbert sind, um das Eindringen strahlender Wärme auszuschliessen. Schliesslich sind die Kannen in gut isolierenden Filz gepackt. … In ihnen hält sich die 190° kalte Flüssigkeit etwa 14 Tage. … Zunächst dürfte sie ein treffliches Kühlmittel abgeben. … Die Schwierigkeiten der Verwendung von flüssiger Luft als Sprengmittel sind noch nicht ganz überwunden, ebenso wie ihre Anwendung als treibende Kraft für Automobile noch in den Kinderschuhen steckt. *(Die Umschau, VI. Jg., Nr. 50, S. 997, 1902)*

Hightech gegen

Biologen und Ingenieure entwickeln Frühwarnsysteme, die bereits kleine Mengen von Erregern und Giftstoffen aufspüren. Damit hoffen sie, die Folgen von Terroranschlägen mit biologischen Waffen mildern zu können.

Von Rocco Casagrande

Hochrangige Mitglieder der US-Regierung verfolgten im Mai 2000 ein beklemmendes Szenario: Eine infektiöse Wolke mit Pesterregern wabert durch das Denver-Center für Darstellende Künste, einen Theaterkomplex mit insgesamt 7000 Zuschauerplätzen. Eine Woche später sind Tausende tot oder liegen im Sterben. Die Grenzen von Colorado sind abgeriegelt. Nahrungsmittel werden knapp, und die medizinische Versorgung bricht zusammen, da Ärzte und Pflegekräfte ebenfalls der Seuche zum Opfer fallen und es keine Antibiotika mehr gibt.

Zum Glück war dieses Geschehen nicht real, sondern nur eine Übung, die im Computer die Auswirkungen eines biologischen Angriffs simulierte. Als Teil eines Planspiels namens TopOff sollte damit den zuständigen US-Behörden demonstriert werden, dass sie nicht warten dürfen, bis Opfer in die Notaufnahmen strömen, wenn sie eine effektive Verteidigung gegen Terroranschläge mit biologischen Waffen aufbauen wollen. Inzwischen sind eine Reihe von Spürsystemen in der Entwicklung, die einen solchen Anschlag frühzeitig melden können. Sie basieren auf mit DNA-Sequenzen oder Antikörpern bestückten Biochips sowie auf elektronischen Nasen, die tödliche Mikroben wittern.

Biologische Kriegsführung ist heimtückisch. In der Luft ausgebrachte Bakterien oder Viren sind nahezu unsichtbar und geruchlos; jemand, der sie einatmet, würde den Angriff erst bemerken, wenn Tage danach die ersten Krankheitssymptome auftreten. Dann wäre es meist zu spät, das Opfer zu retten oder andere vor Ansteckung zu schützen. Wenngleich die meisten biologischen Agenzien nicht sonderlich ansteckend sind, kann ein ▶

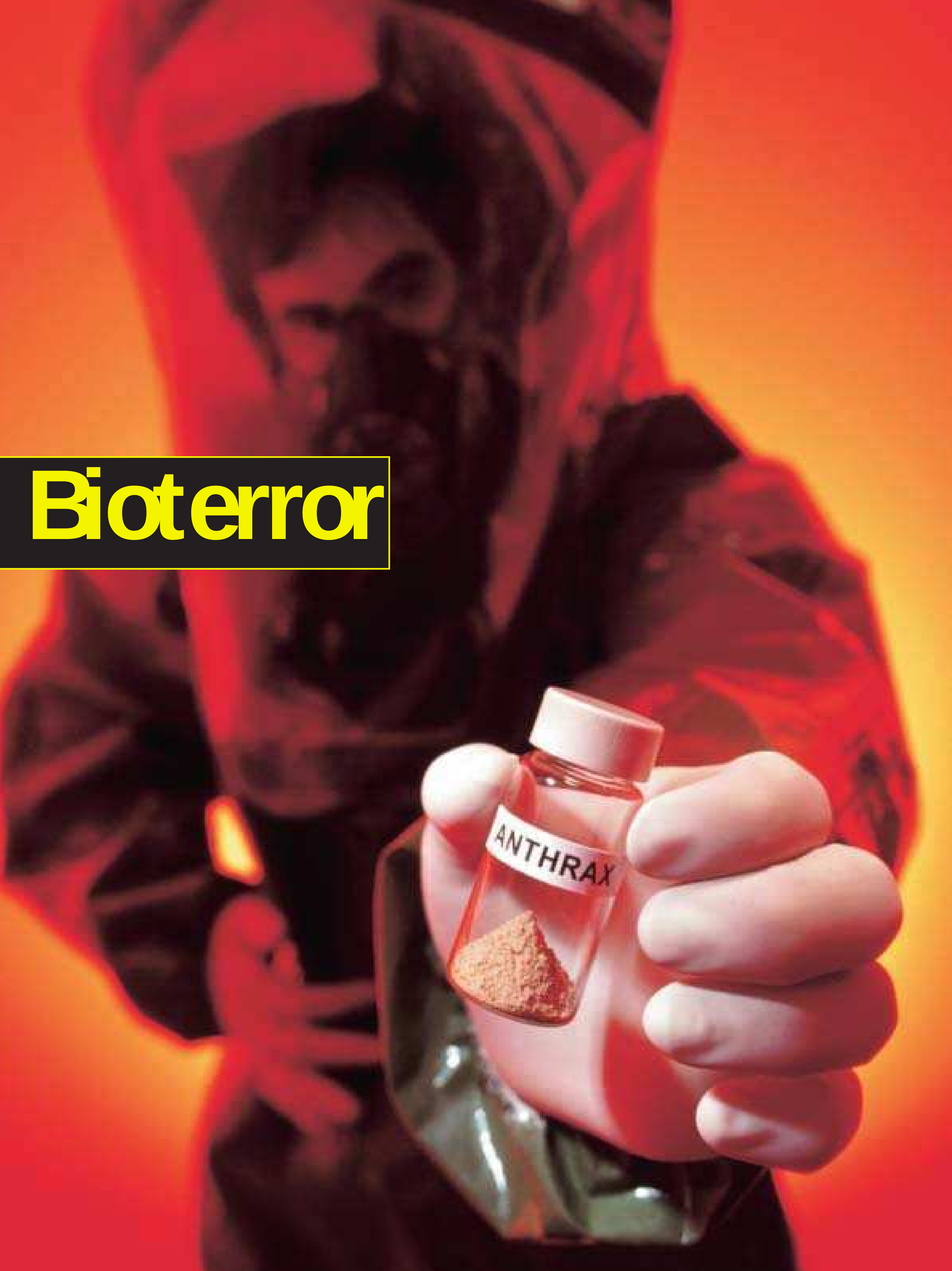
ÜBERBLICK

➤ **Biowaffen** sind unsichtbar und geruchlos; bis Krankheitssymptome auftreten, können Tage vergehen. Deshalb kann ein Anschlag unerkannt bleiben, bis es zu spät für Gegenmaßnahmen ist.

➤ Wissenschaftler entwickeln bestimmte Chips, die mit Hilfe von DNA-Fragmenten oder Antikörpern **pathogene Keime** aufspüren. Ferner entwickeln sie Riechapparate, die von Krankheitserregern abgegebene Stoffe wittern oder Substanzen, die biologischen Kampfstoffen beigemischt wurden.

➤ Wie und wo die neuen **Detektoren** für Biowaffen sinnvoll einzusetzen sind, müssen Politiker und Behörden entscheiden; eine Anbringung etwa an jeder Straßenecke wäre kaum durchführbar.

WILLIAM TAUFIC / CORBIS


Bioterror
ANTHRAX

unerkannt Infizierter die Krankheit dennoch weitergeben.

Die Inkubationszeit bei biologischen Agenzien bietet jedoch eine Frist, innerhalb derer Therapie- und Quarantänemaßnahmen sowie Impfungen noch Unbetroffener greifen können. Viele durch biologische Waffen verursachte Erkrankungen lassen sich mit Antibiotika wirksam bekämpfen, doch meist nur bei rechtzeitiger Gabe – vor dem Einsetzen der Symptome.

Früherkennung ist also entscheidend. Dies umso mehr, als die Anfangssymptome vieler durch biologische Kampfmittel hervorgerufener Erkrankungen, wie Fieber und Übelkeit, leicht mit denen einer Grippe verwechselt werden können. Medizinstudenten lernen, bei der Interpretation von Symptomen zuerst auf das nahe Liegende zu tippen, bevor sie ausgefallenere Diagnosen erwägen – nach dem Motto: „Wenn Sie Hufgetrappel hören, denken Sie an Pferde, nicht an Zebras." Zwar hilft dieser Merksatz in der alltäglichen Praxis; doch Ärzte könnten einen biologischen Anschlag übersehen, wenn sie sich nur nach ihm richten. Manche der neueren Biodetektoren nennt man daher auch salopp Zebra-Chips oder kurz Z-Chips – sie machen darauf aufmerksam, dass diesmal vielleicht doch ein Zebra herumläuft …

Biologische Kampfmittel können ihre Opfer über Lebensmittel, Trinkwasser oder Insekten, etwa Stechmücken, erreichen. Doch das sind minder effektive Methoden, kaum imstande, mit einem Anschlag Tausende von Opfern zu treffen. Als Massenvernichtungsmittel, vergleichbar mit dem Todeszoll von Atomwaffen, wirken sie nur, wenn man sie in der Luft ausbringt – als atembares Aerosol aus Partikeln von etwa einem tausendstel Millimeter Größe. Solch winzige Tröpfchen können mit dem Wind weite Entfernungen zurücklegen und sich tief in der Lunge absetzen, wo sie gefährliche systemische Infektionen auslösen.

Zuverlässig die Nadel im Heuhaufen finden

Will man biologische Kampfmittel in der Luft aufspüren, stellen sich zwei große Herausforderungen. Zunächst die Vielfalt der verwendbaren Pathogene: Unterschiedliche Bakterien, Viren und selbst unbelebtes Material – von Mikroben produzierte Giftstoffe, so genannte Toxine – wären zu erfassen. Ferner können Biowaffen bereits in extremer Verdünnung tödlich sein. Ein gesunder Mensch atmet pro Minute etwa sechs Liter Luft, bestimmte Keime machen bereits krank, wenn man nur zehn von ihnen inhaliert. Um Personen zu schützen, die sich auch nur kurze Zeit in einem kontaminierten Gebiet aufhalten, müsste ein Detektor also weniger als zwei Keime pro Liter Luft erkennen – eine extrem hohe Anforderung.

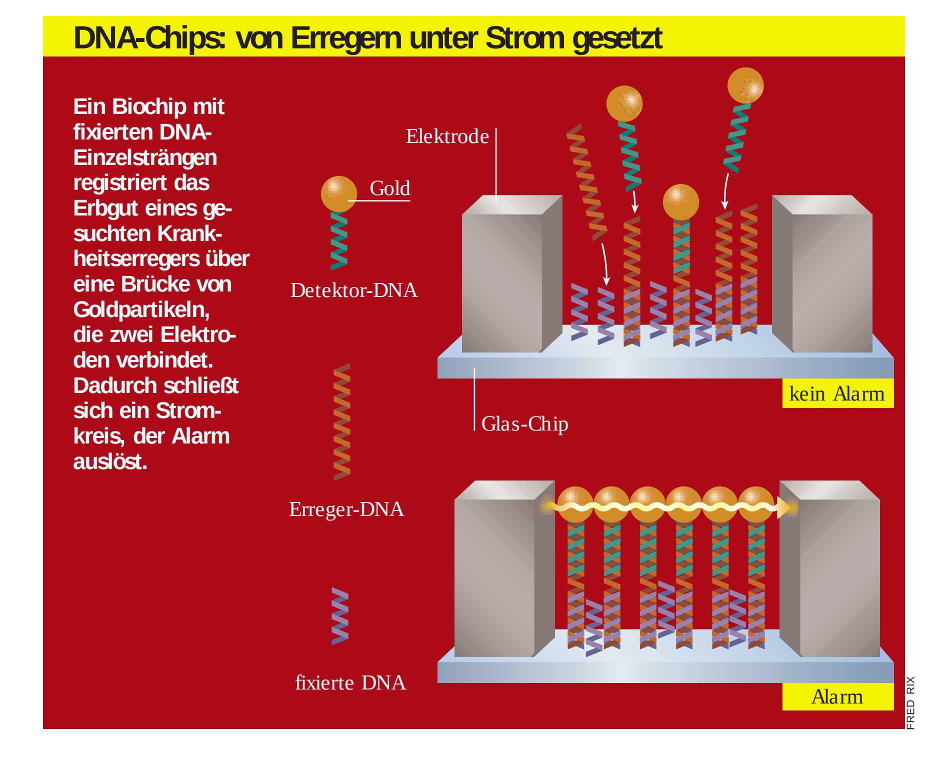
Die ersten funktionstüchtigen Biowaffendetektoren spürten schlicht Wolken kleiner Partikel auf. Manche dieser Luftkeimsammler, etwa das XM2 der US-Armee, das während des Golfkriegs zum Einsatz kam, oder der Spezial-Impinger der Bundeswehr, nehmen Proben der Umgebungsluft und schicken sie durch einen Zähler, der Aerosolpartikel in der für Biokampfstoffe typischen Größe registriert. Ab einem bestimmten Grenzwert gibt das Gerät Alarm, sodass Truppen das Gebiet rechtzeitig verlassen können. Andere in Entwicklung befindliche Partikelsensoren arbeiten mit Lidar, einem radarähnlichen System, das einen Laserstrahl aussendet und die reflektierten Signale auswertet. Bei trockener Luft erkennen Lidar-Geräte Partikelwolken in bis zu fünfzig Kilometern Entfernung. Freilich können sie nicht zwischen Kampfstoffnebeln und feinsten Staub- oder Rauchwolken unterscheiden.

Neuere Lidar-Systeme machen sich die Eigenschaft gewisser in fast allen lebenden Zellen vorkommender Moleküle zu Nutze, nach Anregung mit ultraviolettem Licht zu fluoreszieren, also sichtbares Licht abzugeben. Diese Geräte senden einen UV-Strahl aus und registrieren das zurückkommende Fluoreszenzlicht verdächtiger Luftpartikel. Doch selbst mit UV-Lidar gelingt es nicht, biologische Kampfstoffe und natürliche Biopartikel auseinander zu halten – die Geräte schlagen auch bei Pollenflug oder aufgewehten Pfifferlingssporen an. Gleichwohl helfen sie Einsatztruppen, eventuell kontaminierte Gebiete zu meiden. Auch lässt sich anhand ihrer Messergebnisse entscheiden, ob in bestimmten Gebieten empfindlichere Detektoren eingesetzt werden sollten (siehe dazu den Kasten rechts).

Einige der neuesten Typen von Biowaffendetektoren können Krankheitserreger anhand ihrer genetischen Ausstattung von gutartigen Mikroben oder anderen Partikeln unterscheiden. Um DNA zu gewinnen, die sich innerhalb der Zellen befindet, müssen diese jedoch erst aufgebrochen werden. Manche Geräte erledigen das automatisch, andere benötigen dazu menschliche Helfer.

Einer der ersten DNA-Chips, entwickelt an der Northwestern-Universität in Illinois, beruht auf der komplementären Natur der beiden Stränge, welche zusammen die DNA-Doppelhelix bilden. Ein DNA-Molekül ähnelt einer verdrillten Leiter, bei der jede Sprosse aus zwei Bausteinen, den Basen, besteht. Die Leiter öffnet sich in der Mitte der Sprossen, wenn ein Gen abgelesen wird und die Zelle ihr Erbgut verdoppelt, um sich zu teilen. Vier verschiedene Basen bilden die Sprossen der Doppelhelix: Adenin (*A*), Thymin (*T*), Cytosin (*C*) und Guanin (*G*), wobei innerhalb der Sprossen *A* sich stets mit *T* paart und *C* immer mit *G*.

DNA-Chips: von Erregern unter Strom gesetzt



Ein Biochip mit fixierten DNA-Einzelsträngen registriert das Erbgut eines gesuchten Krankheitserregers über eine Brücke von Goldpartikeln, die zwei Elektroden verbindet. Dadurch schließt sich ein Stromkreis, der Alarm auslöst.

Frühwarnsysteme

Wappnen gegen Bioangriffe


LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY

Dieser Hubschrauber der US-Armee ist mit einem Lidar-System ausgerüstet, das verdächtige Aerosolwolken aus der Ferne orten kann.

Ein Anschlag mit biologischen Waffen kann überall und jederzeit passieren. Fanatiker, die auf Massenmord aus sind, könnten einen ländlichen Jahrmarkt ebenso als Ziel wählen wie eine städtische U-Bahn-Station während der Hauptverkehrszeit. (Im ersteren Fall müssten sie allerdings einen bedeckten Tag wählen, da helles Sonnenlicht die meisten Mikroben abtötet.) Auch wenn die Vielfalt potenzieller Terrorziele einen kompletten Schutz nahezu unmöglich macht, kann ein klug gewählter Einsatz von Biodetektoren die schlimmsten Folgen eines Anschlags begrenzen helfen.

Derzeit sind Detektoren für Biokampfstoffe zu teuer und erfordern zu viel Wartung, als dass sie an jeder Straßenecke montiert werden könnten. Die Vernunft rät jedoch, bestimmte Ereignisse oder Örtlichkeiten verstärkt zu sichern, ihrer Bedeutung oder der hohen Zahl möglicher Opfer wegen. Demokratien sind sicherlich dort am verwundbarsten, wo ihre Regierungen, Parlamente und Ministerien sitzen. Deshalb sollten Regierungsgebäude eine biologische Überwachung rund um die Uhr erhalten. Mit dem Fortschreiten der Technik könnten Biokampfstoffdetektoren so verlässlich, billig und wartungsarm werden, dass sie auch etwa in den Rathäusern jeder größeren Stadt eingesetzt werden könnten.

Leider ist keiner der heutigen Biodetektoren dazu imstande, schädliche Mikroorganismen von harmlosen zu unterscheiden und zugleich seine Umgebung kontinuierlich auf Pathogene zu prüfen. Manche Geräte können nicht selbsttätig Proben sammeln, sondern sind dazu auf menschliche Hilfe angewiesen. Andere sind zwar fähig, mechanisch Wasser- oder Luftproben aufzunehmen, benötigen aber ebenfalls einen Bediener, der die Proben in den für die Analyse erforderlichen Zeitabständen bereitstellt. Der Bediener zieht die Proben zu festgesetzten Zeitpunkten, etwa jede Stunde oder sobald die vorherige Analyse abgeschlossen ist. Jedoch kann eine Wolke freigesetzter Biokampfstoffe binnen Minuten ein Gebiet überstreichen und dann verwehen – nimmt man die Proben zur falschen Zeit, würde man den Angriff gar nicht bemerken.

Manche Detektoren sind mit Lidar-Systemen oder Partikelzählern gekoppelt und sammeln Proben nur dann, wenn sie eine Wolke aus Partikeln der richtigen Größe registrieren. Ähnliche Systeme ließen sich zur Trinkwasserkontrolle in gefährdeten Gebäuden einsetzen: Wenn Schwebstoffe im Wasserleitungsnetz über das zulässige Maß ansteigen, würde ein solches Gerät eine Probe für genauere Analysen ziehen.

Ideal wäre ein System, das seine Umgebung fortlaufend überwacht, Proben rasch analysiert und wenig kostet. Doch davon sind wir noch recht weit entfernt. Epidemiologen und Informatiker arbeiten derzeit an einem etwas anderen Ansatz: Sie erstellen Datenbanken, die aktuelle Symptome von ambulanten Patienten auswerten, um bereits die ersten Anzeichen eines biologischen Angriffs zu erkennen. Das System beruht auf Handcomputern, über die Ärzte Informationen in die Datenbank eingeben, worauf ein Programm nach ungewöhnlichen Krankheitsmustern sucht – etwa Häufung von grippeähnlichen Erkrankungen außerhalb der Grippesaison.

Ein solches System – das Lightweight Epidemiology Advanced Detection and Emergency Response System (Leaders) – arbeitet seit 2000 in den USA und durchstöbert Krankenhausdatenbanken in Gebieten, wo politische oder sportliche Großveranstaltungen stattfinden. Der Tatsache bewusst, dass kaum jemand mit einer vermeintlichen Grippe in ein Krankenhaus geht, haben die Programmierer von Leaders zusätzliche Parameter in ihre Datenbankanalyse eingefügt, darunter Verkäufe rezeptfreier Medikamente, Krankmeldungen von Arbeitnehmern und auch das Aufkommen von Mautgebühren an kostenpflichtigen Brücken und Straßen (da viele bei Unwohlsein eher auf ihr Auto verzichten). Im Idealfall müssten diese Datenbanken kontinuierlich aktuelle Patienteninformationen sammeln, und zwar landesweit, sodass Angriffe frühzeitig erkannt werden können – gleichgültig wo, wann und wie sie erfolgen.

Kennt man die Basensequenz des einen Stranges – zum Beispiel *ATCGCC* –, so weiß man auch die Komplementärsequenz des anderen, in diesem Fall also *TAGCGG*.

Das Sensorelement des Systems der Northwestern-Universität enthält DNA-Einzelstränge, die zu einer kurzen DNA-Sequenz aus dem Erbgut eines bestimmten aufzuspürenden Krankheitskeims komplementär sind. Die Einzelstränge – gleichsam halbe, an den Sprossen durchtrennte Leitern, die auf Vervollständigung warten – sind auf einem Glas-Chip zwischen zwei Elektroden verankert. Gelangt DNA des gesuchten Erregers in das System, lagert sie sich nach den Regeln der Basenpaarung an die fixierten Einzelstränge an, wobei sie nun ihrerseits ein Stück aus der vervollständigten Leiter herausragt. Zum Nachweis der Anlagerung – oder Hybridisierung – gibt ein Laborant weitere DNA-Fragmente hinzu, die zu dem freien Ende der gesuchten DNA komplementär sind und ein Goldkügelchen tragen. Nach dieser zweiten Hybridisierung schließen die Goldpartikel einen Stromkreis zwischen den Elektroden und geben Alarm (siehe Grafik links).

Andere Biodetektoren mit DNA, wie sie auch das Wehrwissenschaftliche Institut der Bundeswehr in Munster entwickelt, vervielfältigen spezifische Erbgutsequenzen durch einen Prozess namens Polymerase-Kettenreaktion (*polymerase chain reaction*, PCR). Dabei erhitzt man DNA, damit die Bindungen zwischen den Basen in den Leitersprossen aufbrechen und die beiden Stränge sich trennen. Man gibt kurze einzelsträngige DNA-Stücke, Primer genannt, hinzu, die so gestaltet sind, dass sie sich an die beiden Enden derjenigen DNA-Sequenz anlagern, die nachgewiesen werden sollen. Nach Abkühlung des Gemisches binden die Primer an ihre Zielstellen, Enzyme (DNA-Polymerasen) klinken sich dort ein und verlängern die Primer, sodass aus ursprünglich zwei Einzelsträngen der gesuchten Sequenz vier entstehen. Mit jeder Wiederholung dieser Reaktionsfolge verdoppelt sich die Kopienzahl der gesuchten Sequenz, bis genug für einen Nachweis da ist.

Tiger kann Erreger identifizieren

Durch Zugabe fluoreszierender Indikatormoleküle, die sich in die neu synthetisierten DNA-Stücke einlagern, lässt sich ohne Zeitverzögerung verfolgen, wie die Vervielfältigung des gesuchten Erbgutabschnitts voranschreitet. Zudem gibt es inzwischen sehr schnelle Thermozykler, PCR-Maschinen, die den notwendigen Erhitzungs- und Kühlungsvorgang pro Reaktionsrunde in weniger als einer Minute schaffen, was dreißig Verdopplungen einer seltenen DNA-Sequenz binnen einer halben Stunde ermöglicht.

Freilich müssen beide Systeme, der Stromkreisalarm und die PCR-basierte Spürmethode, mit Reagenzien vorbestückt sein, die für einen bestimmten Krankheitserreger spezifisch sind. Das heißt, man muss bereits vorher ahnen, welche Biowaffe zum Einsatz kommen könnte. Um diesen Nachteil zu umgehen, haben Forscher zweier Firmen in Kalifornien, Ibis Therapeutics in Carlsbad und Science Applications International Corporation in San Diego, ein System entwickelt namens „Triangulation Identification Genetic Evaluation of biological Risks“ (genetische Bewertung biologischer Risiken durch Dreiecksidentifikation), kurz Tiger. Auch Tiger nutzt die Vervielfältigung von DNA mittels PCR-Methode; anders als vorherige Ansätze jedoch verwendet es Primer, die zu einem DNA-Segment hybridisieren, das an der Kontrolle der Proteinsynthese beteiligt ist – einer Grundmaschinerie aller lebenden Zellen. Gleichwohl kann Tiger verschiedene Organismen unterschei- ▶

Bioterrorismus

Vorbereitung ist die beste Verteidigung

Das Risiko von Anschlägen mit Biowaffen fordert das öffentliche Gesundheitswesen heraus.

Von Stephen S. Morse

Als Ärzte im Oktober 2001 bei Robert Stevens aus Florida eine Milzbrandinfektion diagnostizierten, vermuteten sie dahinter einen der seltenen natürlich auftretenden Fälle dieser Erkrankung. Nachdem allerdings auch ein Kollege von Stevens erkrankte, waren die gesamten USA alarmiert. Insgesamt fünf Menschen starben an Milzbrand (auch Anthrax genannt), und nur dank der raschen Einsicht, dass diese ersten Infektionen auf einer absichtlichen Freisetzung der Erreger beruhten, konnte Schlimmeres verhütet werden: Neuinfektionen wurden schneller diagnostiziert und behandelt, und die Behörden konnten Briefe mit Milzbranderregern, dem *Bacillus anthracis*, sicherstellen.

Lange Zeit hatten Regierungsvertreter das Thema Bioterrorismus als Angelegenheit für die Strafverfolgungsbehörden angesehen. Aber die Milzbrandfälle und auch die kurz zuvor in den USA durchgeführten Simulationen von Anschlägen mit Pocken- und Pesterregern haben deutlich gezeigt, dass Bioterrorismus in erster Linie das öffentliche Gesundheitswesen herausfordert. Trotz aller Experimente mit Sensoren, die kleinste Mengen freigesetzter Pathogene registrieren sollen: Auf absehbare Zeit werden wohl erkrankte Personen, die in die Notaufnahmen der Krankenhäuser kommen, den ersten Hinweis auf einen Terroranschlag mit Biowaffen liefern. Das Gesundheitswesen ist jedoch auf einen Massenandrang von Infizierten nicht vorbereitet – ganz zu schweigen von dem Ansturm all derer, die sich aus Sorge vor einer möglichen Infektion behandeln lassen wollen.

Unabhängig davon, ob eine Seuche durch Terroranschläge oder auf natürliche Art zum Ausbruch kommt: Die Art der Vorbereitung entscheidet darüber, ob sie rasch eingedämmt werden kann oder das Gesundheitswesen zusammenbrechen lässt. Besonders Ärzte, Krankenschwestern und alle, die sich um die ersten Patienten kümmern, müssen gewappnet sein; ebenso Laborangestellte, welche die Krankheitsursache ermitteln, und Vertreter des öffentlichen Gesundheitswesens, die für den Schutz der Bevölkerung zuständig sind. Die Eindämmung der Seuche hängt davon ab, ob dieser Personenkreis ungewöhnliche und potenziell gefährliche Vorkommnisse sofort als solche erkennt, und ob alle erforderlichen Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Eine Voraussetzung hierfür sind vollständig ausgearbeitete Pläne, die Aufgaben und Verantwortlichkeiten aller verfügbaren Kräfte im öffentlichen Gesundheitswesen festlegen.

Ein effektives Frühwarnsystem erfordert drei Elemente:
➤ klinische Erkennung,
➤ epidemiologische Untersuchungen,
➤ ausreichende Laborkapazität.

Eine Bedingung für die klinische Erkennung ist, dass Ärzte und anderes medizinisches Personal über die Erscheinungsbilder ungewöhnlicher Krankheiten informiert sind, dass sie im Falle von atypischen Symptomen die für eine sichere Diagnosestellung benötigten Tests veranlassen und dass sie die Befunde an die zuständigen Stellen weitermelden. Etwa die Hälfte der an Lungenanthrax Erkrankten entwickelt eine Meningitis. Diese war auch bei Robert Stevens diagnostiziert worden; und als Tests dann als deren Ursache eine Milzbrandinfektion ergaben, meldeten die Ärzte den Befund sofort den zuständigen Behörden.

In der Regel wird aber ein Arzt wohl kaum die Symptome eines Patienten sofort mit dem Ausbruch einer Seuche in Verbindung bringen. Effektiver wäre es, alle praktischen Ärzte in so genannter Syndrom-Überwachung zu schulen: das bedeutet, aktiv auf bestimmte Syndrome zu achten und sie zu melden, so etwa grippeähnliche Erkrankungen oder Ausschläge, wie sie häufig von potenziellen Biowaffen verursacht werden. Die Labortests werden in den meisten Fällen als Ursache eine natürliche Infektion feststellen. So sollte eine Syndrom-Überwachung für grippeähnliche Erkrankungen als Ursache natürlich in erster Linie die Grippe ermitteln. Das wäre an sich schon sinnvoll, da pandemische Stämme des Grippeerregers ein ernst zu nehmendes Gesundheitsrisiko darstellen. Andererseits beginnen aber auch manche durch Biowaffen ausgelöste Erkrankungen mit eben solchen grippeähnlichen Symptomen, vor allem wenn die Infektion über

das Einatmen der Erreger erfolgt wie bei Lungenmilzbrand und Pest.

Auch subtilere Anzeichen könnten auf den Ausbruch einer Seuche hinweisen – etwa ein unvermittelter Anstieg von Arzneimittelkäufen in Apotheken, eine überdurchschnittliche Anzahl an Krankmeldungen sowie ein gehäuftes Auftreten spezifischer Symptome bei Patienten in Krankenhäusern.

Im Jahr 1993 haben meine Kollegen und ich das Programm ProMED (Program for Monitoring Emerging Diseases) gegründet. Mit dessen Hilfe soll die weltweite Überwachung von Infektionserkrankungen gefördert und speziell auf Anzeichen neuartiger Erkrankungen geachtet werden. Im Folgejahr kamen wir dem Ziel ein Stück näher, als Jack Woodall vom New Yorker Gesundheitsamt und ich die so genannte ProMED-Mail eingerichtet haben. Über dieses offene E-Mail-System können Ärzte weltweit klinische Befunde melden. Heute wird ProMED-Mail von der Internationalen Gesellschaft für Infektionserkrankungen verwaltet. Die erhaltenen E-Mails werden an alle 25 000 Abonnenten, darunter auch Seuchenexperten, weitergeleitet, die Kommentare abgeben und weitere Schritte veranlassen können. Es gibt zwar kein formales Reaktionsschema, aber die Weltgesundheitsorganisation überwacht die ProMED-Mail, benachrichtigt die örtlichen Vertreter und empfiehlt weitere Schritte. Durch ein umfassenderes weltweites Überwachungssystem, ähnlich der globalen Wetterbeobachtung, könnten unsere Chancen, jeden Sturm am Horizont sofort zu erkennen und schnell zu reagieren, deutlich verbessert werden.

Als zweites Standbein des Frühwarnsystems sollten bereits beim ersten Fall einer ungewöhnlichen Erkrankung – wie zum Beispiel nach Inhalation von Milzbrand- oder Ebola-Erregern – epidemiologische Untersuchungen veranlasst werden. Leider ist zurzeit noch kein nationales Gesundheitssystem in ausreichendem Maße dafür ausgelegt.

FRED RIX

Erhöhte Nachfrage nach bestimmten Medikamenten kann auf eine ungewöhnliche Epidemie hinweisen. So suchte ein erkrankter Reporter aus Milwaukee 1993 vergeblich nach dem Durchfallmittel Imodium. Das von ihm alarmierte Gesundheitsamt stellte fest, dass in der Stadt der Parasit *Cryptosporidium* grassierte.

Die dritte Komponente ist die Laborkapazität. Medizinischen Laboratorien kommt eine Schlüsselrolle zu, wenn es darum geht, spezifische Krankheitserreger frühzeitig zu identifizieren und sie in den unterschiedlichsten Proben nachzuweisen. In den USA wurde seit 1999 als unterstützende Maßnahme das „Laboratory Response Network“ für Bioterrorismus entwickelt. Dieses Labornetzwerk umfasst landesweite Laboratorien für klinische Mikrobiologie, die Grundlagendiagnostik betreiben und bestimmte Erreger anzüchten und identifizieren können. Proben, die ein einfach ausgestattetes Labor nicht abklären kann, werden dann an ein Labor der nächsthöheren Ausstattungsstufe weitergeleitet.

Seit den Ereignissen des 11. September 2001 und den anschließenden Milzbrandanschlägen hat die US-Regierung wiederholt eine höhere Aufmerksamkeit gegenüber Anschlägen mit Biowaffen angemahnt. Auf die Gründung eines neuen „Amtes für Bereitschaft im Gesundheitswesen“ (Office of Public Health Preparedness) innerhalb der US-Gesundheitsbehörde folgte die zusätzliche Ausstattung mit Bundesmitteln in Höhe von 2,9 Milliarden US-Dollar. Das ist wohl die größte Einzelsumme, die jemals in die öffentliche Gesundheitsvorsorge der USA geflossen ist. Damit soll vor allem deren Infrastruktur verbessert werden. Auch der Vorrat an Medikamenten und Impfstoffen soll aufgestockt werden. Geplant ist, im Notfall die gesamte US-Bevölkerung gegen Pocken zu impfen. Ein Ausbruch dieser als ausgerottet geltenden Erkrankung ist zwar äußerst unwahrscheinlich, die Konsequenzen wären jedoch derart schwerwiegend, dass eine Prävention angebracht erscheint.

Sobald eine Erkrankung diagnostiziert ist, besteht der nächste Schritt darin, ihre Ausbreitung einzudämmen und Kontaktpersonen zu behandeln. Auch das hängt von der Qualität von Überwachung und Kommunikation ab. Wo treten die meisten klinischen Fälle auf? Wo werden welche und wie viele Antibiotika oder andere Medikamente benötigt? Wie können Spezialeinheiten verseuchte Regionen am besten dekontaminieren, und welche Regionen haben oberste Priorität? Welche Eigenschaften des Erregers können einen Hinweis auf die Urheber des Angriffs geben? Sind Quarantänemaßnahmen erforderlich, und wenn ja, welche? Ebenso muss der reibungslose Datenaustausch innerhalb der kommunalen, der Landes- und der staatlichen Gesundheitsämter sowie zwischen dem öffentlichen Gesundheitswesen und den Behörden der Strafverfolgung gewährleistet sein.

Die Infrastruktur des öffentlichen Gesundheitswesens ist nicht nur ein essenzieller Bestandteil der Verteidigung – sie könnte sehr wohl die einzige Möglichkeit zur frühzeitigen Erkennung eines Anschlags mit Biowaffen sein. Eine Investition in Schutzmaßnahmen würde sich aber nicht nur im Fall X lohnen, der hoffentlich nie eintritt. Auch im Falle natürlicher Infektionserkrankungen würde sich ein entsprechend gewappnetes Gesundheitssystem bezahlt machen, denn aufgrund der zunehmenden globalen Vernetzung dürften Infektionserkrankungen künftig wohl noch zahlreicher ausbrechen und sich noch rascher ausbreiten. Eine tatkräftige öffentliche Vorbereitung kann deshalb auf jeden Fall Leben retten.

***Stephen S. Morse** ist Virologe und Direktor an der Mailman School of Public Health der Columbia-Universität in New York.*

den, da die Sequenz zwischen den gewählten Primern so variabel ist, dass praktisch jede Mikrobenart eine eigene besitzt. Die vervielfältigten Sequenzabschnitte lassen sich durch Massenspektrometrie analysieren und mit einer Datenbank entsprechender Muster aller bekannten Mikroorganismen abgleichen, wodurch man den gerade vorliegenden Erreger identifizieren kann.

Dennoch haben alle DNA-basierten Spürsysteme ihre Grenzen: Sie sprechen nicht auf Toxine an, die keine DNA besitzen, und wegen ihrer Reaktionszeit von etwa einer halben Stunde sind sie zu träge, um rechtzeitig Alarm zu schlagen – die Evakuierung eines von Biokampfstoffen bedrohten Gebiets ist dann kaum noch möglich.

Antikörper bringen es ans Licht

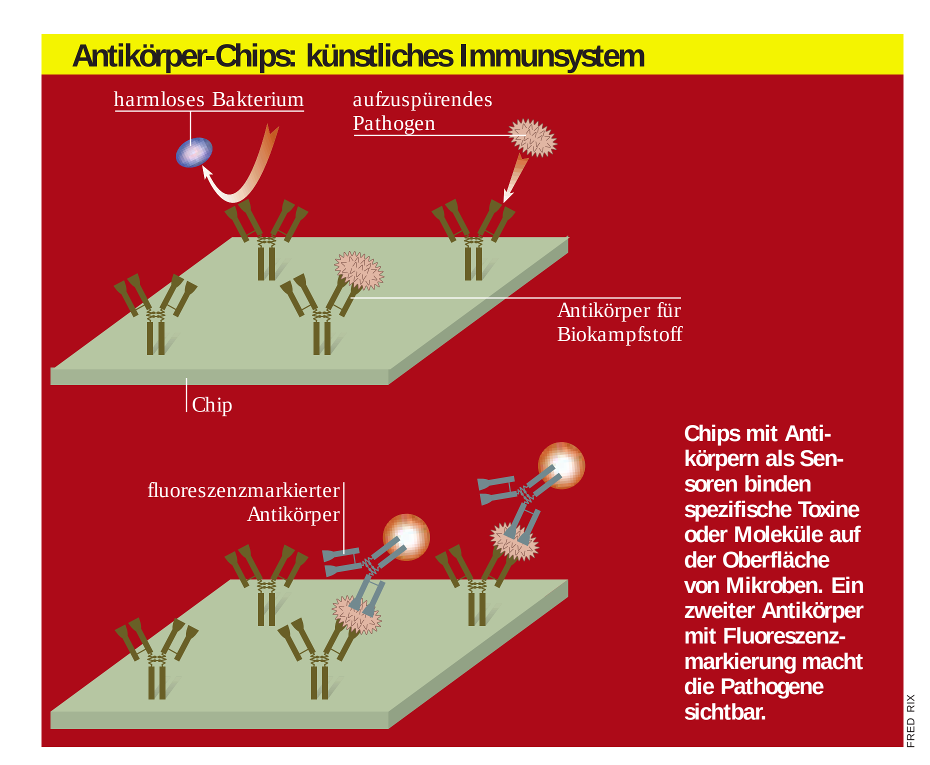
Chips, die mit Antikörpern arbeiten, können diese Hindernisse überwinden. Antikörper sind Y-förmige Eiweißmoleküle, die das Immunsystem produziert und die gezielt an die Fremdmoleküle von in den Körper eindringenden Krankheitskeimen binden. Da Antikörper auch Oberflächenmoleküle von Mikroben erkennen, ist deren Aufbrechen nicht mehr notwendig, was Zeit spart. Überdies können sie sowohl ganze Mikroorganismen als auch einzelne Toxine aufspüren.

Antikörper sind das Herzstück eines Biowaffendetektors namens Raptor, den das Forschungslabor der US-Marine entwickelt hat. Das System beruht auf einem Sandwich-Assay (etwa: Klappstullen-Test): Gesuchte Pathogene (sozusagen die Wurstscheibe) bleiben an Antikörpern auf dem Chip (der unteren Brotschnitte) hängen, dann kommt ein zweiter Antikörper (die obere Brotschnitte) hinzu, der mit einem Fluoreszenzfarbstoff gekoppelt ist und die gebundenen Pathogene sichtbar macht (siehe Grafik unten). Raptor kann verschiedene Biokampfstoffe zugleich erkennen, wenn man den Chip abschnittsweise mit entsprechend unterschiedlichen Antikörpern versieht, sodass man gleichsam ein Sandwich mit verschiedenen Wurstsorten erhält.



UN PHOTO LIBRARY / UNSCOM

Der Nachweis von biologischen Kampfstoffen ist äußerst aufwendig. Automatische Detektoren könnten das Verfahren vereinfachen.



Das Origen-System der Firma Igen in Gaithersburg (Maryland) arbeitet ähnlich, doch statt eines Fluoreszenzfarbstoffs benutzt es eine Markierungssubstanz, die nach Anlegen eines elektrischen Feldes mit einer Lichtemission reagiert. Dieses Signal ist heller als das Fluoreszenzlicht, sodass geringere Konzentrationen an Pathogenen nachweisbar sind. Überdies ist einer der Antikörper an eine Oberfläche gekoppelt, wodurch sich die Zielpathogene für einen besseren Nachweis anreichern können. Das Wehrwissenschaftliche Institut in Munster führt derzeit vergleichende Untersuchungen der Raptor- und Origen-Systeme mit Prototypen aus deutscher Entwicklung durch.

Bei Surface Logix haben wir zusammen mit der in Watertown (Massachusetts) ansässigen Firma Radiation Monitoring Devices eine Technik entwickelt, die kontinuierlich Pathogene erfassen kann. Das Gerät, das sich mit einem Luftkeimsammler verbinden lässt, mischt alle Partikel aus gewonnenen Proben mit einer Suspension von mikroskopisch kleinen Magnetperlen. Jede davon ist mit fluoreszenzmarkierten Antikörpern bedeckt, die unterschiedliche Krankheitserreger erkennen.

Der Probenstrom mit den Magnetperlen fließt durch einen engen Kanal von etwa der Weite eines Haares und trifft auf einen Kontrollstrom ohne Mikroben und ohne Magnetperlen. Beide Ströme fließen zunächst getrennt nebeneinander, bis sie eine Verbindungsstelle zwischen beiden Kanälen erreichen. Ein Magnet, der kurz vor der Verbindungs-

Elektronische Spürnasen: Kampfstoffe erschnüffeln

Geruchsstoff

alle Schaltkreise geschlossen

stromleitende Körnchen

Riechzapfen

ein Schaltkreis unterbrochen

FRED RIX

Eine elektronische Spürnase ist mit unterschiedlichen Riechfingern ausgestattet, die jeweils bei Wahrnehmung eines bestimmten Geruchsstoffs anschwellen. Dadurch werden einzelne Schaltkreise unterbrochen. Der Sensor löst damit nicht nur Alarm aus, sondern gibt über das Muster der angeschwollenen Riechfinger auch Auskunft über die Art des detektierten Geruchsstoffs.

stelle liegt, zieht die Magnetperlen samt eventuell daran gebundener Pathogene in den Kontrollstrom. Dieser fließt dann durch einen Detektor, der Pathogene anhand ihrer Fluoreszenz registriert.

Ein wesentlicher Vorteil unseres Systems liegt darin, dass es Zielpathogene von Tausenden harmloser Mikroben aussondert, die in einer Probe vorhanden sein können. Rauch, Staub und sonstige Umweltpartikel beeinflussen den Erkennungsprozess nicht, da die Mikroperlen bereits vorher in den Kontrollstrom gezogen werden. Zudem kann die Apparatur kontinuierlich Proben aufnehmen und ohne Zeitverzögerung analysieren.

Andere Spürsysteme nutzen Antikörper, um Pathogene an oszillierende Systeme zu binden, etwa Quarzkristalle, dünne Membranen oder mikroskopisch kleine Schwingstäbe. Eine erfolgreiche Bindung ändert die Eigenfrequenz der Oszillatoren, was sich elektronisch nachweisen lässt.

Spürnasen wittern Angriffe

Die oben beschriebenen Detektoren sind entweder schon jetzt verfügbar oder werden innerhalb der nächsten Jahre kommerziell erhältlich sein. Jedoch sind parallel dazu weitere und vielleicht bessere Techniken in Entwicklung.

Elektronische Nasen – wie man sie bereits nutzt, um Sprengstoffe und chemische Waffen aufzuspüren – lassen sich auch für die Suche nach Biokampfstoffen anpassen. Ein solches Gerät, die „Cyranose“ der Firma Cyrano Sciences im kalifornischen Pasadena, enthält eine Anordnung von Zapfen aus leicht unterschiedlichen Polymeren, die jeweils eine andere Substanz gleichsam riechen, indem sie diese spezifisch absorbieren. Die Zapfen beherbergen zudem kleine Körnchen eines leitenden Materials, die einander berühren und so einen Stromkreis schließen. Wenn ein Zapfen seinen Geruchsstoff aufnimmt, schwillt er an, wodurch die Körnchen auseinander weichen und der Stromfluss abreißt, was ein Signal erzeugt (siehe Grafik oben). Jeder erfassbare Geruch erzeugt ein eindeutiges Muster unterbrochener Schaltkreise. Biosensoren könnten so Stoffe erschnüffeln, die von gefährlichen Bakterien abgesondert wurden, oder bestimmte Zusatzchemikalien, etwa Stabilisatoren, die oft in biologischen Kampfstoffen enthalten sind. Das Ziel ist, ein für jeden Biokampfstoff einzigartiges Riechmuster zu finden.

In einem neuartigen Ansatz nutzt die Firma BCR Diagnostics in Jamestown (Rhode Island) ruhende Dauerformen von Bakterien, nämlich Sporen, um die Anwesenheit von Biowaffen anzuzeigen. Wenn Bakterien in den Detektor eindringen, aktiviert ihr Stoffwechsel eine Substanz, welche die im Detektor enthaltenen Sporen zum Auskeimen veranlasst. Da die Sporen genetisch so verändert sind, dass sie dabei Licht emittieren, entsteht sehr rasch ein Signal. Freilich spricht das Spürgerät auch auf harmlose Bakterien an. Es ließe sich jedoch verbessern, indem man es mit speziell entworfenen Substanzen versieht, die den Keimungsprozess der Detektorsporen nur in Anwesenheit ausgewählter Pathogene in Gang setzen.

Gleichwohl könnte eine fachlich versierte Terroristengruppe auch den besten Biowaffendetektor überlisten: Sie bräuchte nur einen sonst harmlosen Organismus genetisch so zu verändern, dass er tödliche Toxine produziert.

Der ideale Detektor müsste in Gegenwart eines Biokampfstoffs genauso reagieren wie dessen lebende Ziele, nur viel schneller. Darum unterstützt die Defense Advanced Research Projects Agency (die Forschungs- und Entwicklungsbehörde des US-Verteidigungsministeriums) die Forschung an Biowaffendetektoren, die mit lebenden Zellen von Menschen, Tieren und Pflanzen arbeiten. Der Leitgedanke dabei ist, dass ein für den Menschen schädliches Agens mindestens einen Typ menschlicher Zellen schädigt; die Messung der Zelltodereignisse im Detektor würde anzeigen, ob in der Umgebung ein Schadorganismus vorhanden ist.

Biologische Waffen können furchtbar sein, doch bisher hat weder ein Staat noch eine Terroristengruppe zu diesem Mittel gegriffen, um Tausende zu töten. Selbst wenn ein solcher Angriff deshalb als unwahrscheinlich erscheint, können Biodetektoren neben ihrer Frühwarnfunktion auch andere Aufgaben übernehmen, etwa verseuchte Nahrungsmittel erkennen oder die Diagnose von Infektionskrankheiten erleichtern. Ferner lassen sich Detektoren auf Basis lebender Zellen auch dazu nutzen, die Reaktion von Krebszellen gegenüber diversen Wirkstoffen zu testen, was die Entwicklung von Krebsmedikamenten beschleunigen könnte. Auf diese Weise würden Schilde – nicht Schwerter – zu Pflugscharen umgeschmiedet. ■



Rocco Casagrande *entwickelt für die Biotechnik-Firma Surface Logix in Brighton (Massachusetts) Detektoren für biologische Kampfstoffe. Er hat als Berater für das US-Verteidigungsministerium gearbeitet und ist Mitglied der Forschungsgruppe zur Kontrolle gefährlicher Pathogene an der Universität von Maryland. Ferner gehört er zu den UN-Inspektoren, welche die chemische und biologische Abrüstung des Iraks kontrollieren sollen.*

Webhinweise

zu diesem Thema finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Inhaltsverzeichnis“.*

Die Rolltreppe

Advent, Advent. In diesen Tagen haben Kaufhäuser Hochkonjunktur, und auf mehreren Etagen präsentieren sie verlockende Angebote. Die nötige Infrastruktur, um Hunderte von Kunden tagtäglich zwischen den Stockwerken zu befördern, schaffen Rolltreppen. Auch in den Untergrund-Bahnhöfen der Großstädte haben diese auch Fahrtreppen genannten Anlagen derzeit Hochkonjunktur.

An einer Endloskette befestigt und von einem Elektromotor angetrieben, laufen Stufen aus Aluminiumdruckguss unablässig rundum. Dabei bilden die auf der Unterseite der Anlage abrollenden Stufen ein Gegengewicht zu den aufsteigenden. Wie ihr Verwandter, der Aufzug, muss auch die Fahrtreppe deshalb nur das Gewicht der Ladung – Personen samt Gepäck – tragen und Reibungskräfte überwinden.

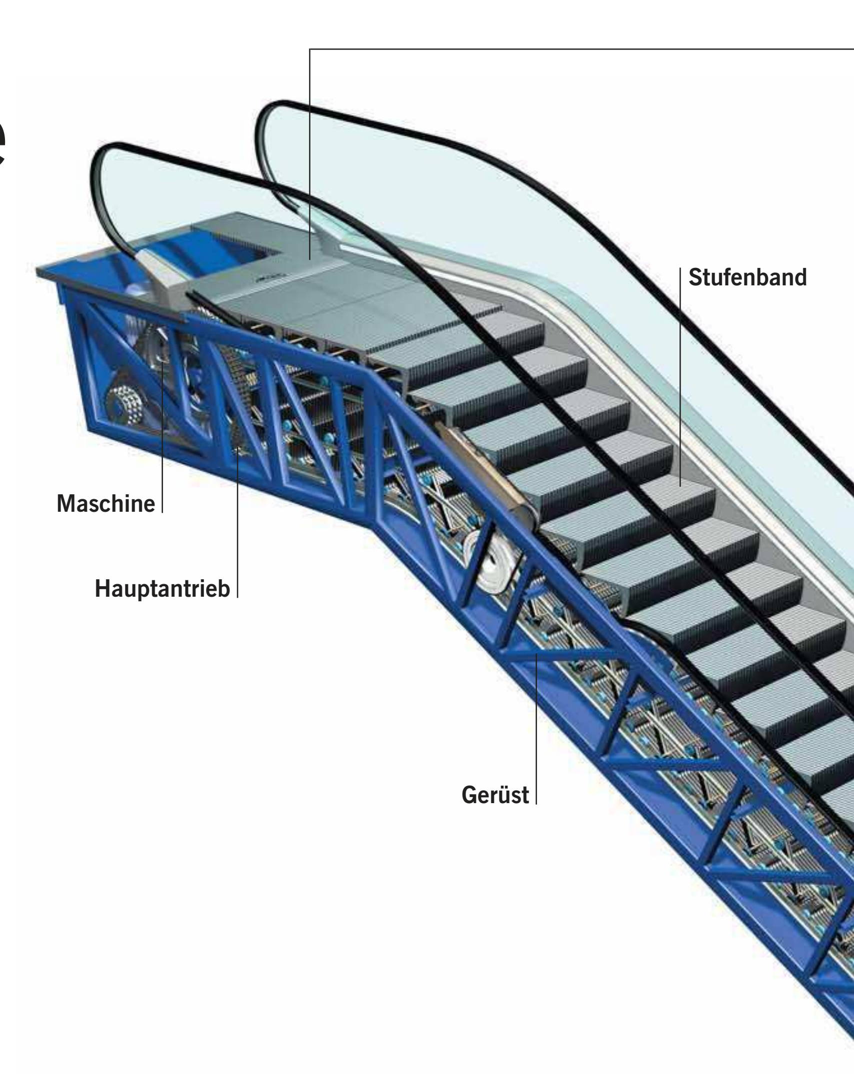
Die Hersteller bringen ihre Anlagen oft schon komplett montiert zum Einsatzort. Müssen nur drei bis sechs Meter Förderhöhe überwunden werden, sind Rolltreppen meist 30, maximal 35 Grad geneigt; bei größeren Distanzen verlaufen sie etwas flacher. Selten liegt die Einbauhöhe über 30 Meter, aber Ausnahmen bestätigen die Regel: In der U-Bahn von Kiew überwindet eine Rolltreppe 65 Meter Höhenunterschied.

Die Breiten der Stufen sind weltweit genormt und betragen 60, 80 oder 100 Zentimeter. Standardisiert sind auch die Fahrgeschwindigkeiten, die hier zu Lande bei 0,5, 0,65 oder 0,75 Meter pro Sekunde liegen. Die Betreiber ordern eine Rolltreppe anhand einer Bedarfsabschätzung: Theoretisch vermag eine auf den langsamsten Wert eingestellte Anlage mit den schmalsten Stufen stündlich 4500 Personen zu befördern.

Sicherer Betrieb sowie Zuverlässigkeit sind Grundforderungen. Deshalb verfügt jede solche Anlage über Nothalt-Schalter und Automatismen, um beispielsweise bei einem Stufenbruch oder eingeklemmten Gegenständen anzuhalten. Auch an die Robustheit werden hohe Ansprüche gestellt. So muss eine Fahrtreppe in Bahnhöfen 140 000 Stunden absolvieren, das entspricht bei einer durchschnittlichen Betriebsdauer von zwanzig Stunden pro Tag immerhin zwanzig Jahren. Zum Vergleich: Ein Personenkraftwagen kommt im Durchschnitt gerade mal auf 4000 bis 5000 Betriebsstunden.

Georg Küffner

Der Autor ist Technikjournalist in Frankfurt am Main. Wir danken Martin Mehlert vom Fahrtreppenwerk Stadthagen der Firma Otis für Fachberatung.





Im Luna-Park auf Coney Island erfreute ein Vorläufer der Rolltreppen mit fahrbaren Sitzen 1903 die New-Yorker Gesellschaft. Bald entdeckten Kaufhäuser und Verkehrsbetriebe den Nutzen der neuen Erfindung.

obere Landestelle
Um den Passagieren eventuelle Ängste zu nehmen, laufen am Beginn der Rolltreppe – insbesondere bei Fahrtrichtung von oben nach unten – mindestens zwei, bei größeren Höhen bis zu sechs Stufen zunächst horizontal.

Handleiste
Ein mitbewegter Handlauf, an dem sich die Fahrgäste festhalten können, gibt Sicherheit.

Balustrade

Fußverkleidung
Verkleidungsbleche verringern den Spalt zwischen Stufen und Seitenwand auf maximal 1,5 Millimeter.

Kammplatte
Ein Kamm bildet die Schnittstelle zwischen dem festen und dem bewegten Teil der Fahrtreppe, die Längsrippen der Stufen laufen in ihn hinein.

untere Landestelle

OTIS

Wussten Sie schon … ?

➤ Die Idee, mit beweglichen Stufen Höhenunterschiede zu überwinden, hatte der Amerikaner George A. Wheeler; doch er scheiterte bei der Realisierung und musste sein 1892 angemeldetes Patent sechs Jahre später an Charles D. Seeberger verkaufen. Nach dessen Plänen baute der New-Yorker Aufzughersteller Otis einen funktionsfähigen Prototyp. Auf der Pariser Weltausstellung von 1900 beförderte der Otis Escalator die Besucher des amerikanischen Pavillons auf dessen erste Etage.

➤ Selbst sehr lange Rolltreppen dürfen vollbesetzt nur um wenige Millimeter durchhängen. Andernfalls würden sich die Spalte zwischen den Stufen und diejenige zwischen den einzelnen Stufen und den seitlichen, feststehenden Blechen zu weit öffnen. Die Fahrgäste könnten hängen bleiben und sich verletzen.

➤ Seit Mitte der 1990er Jahre bieten Fahrtreppen-Hersteller wartungsfreie Stufenketten an. Eine zusätzliche Schmierung ist nicht mehr erforderlich, es fällt kein zu entsorgendes Altöl an und die Brandgefahr ist weiter vermindert.

➤ Fahrtreppen sollten wenig Strom verbrauchen. Deshalb laufen sie unbenutzt oft gar nicht oder mit verringerter Geschwindigkeit. Nähert sich ein Fahrgast, melden Radarsensoren, Lichtschranke oder Kontaktmatten dies an eine Steuerung und die Anlage wird hochgefahren.

LEBENSMITTELTECHNIK

Mikroben im Fluss

Ohne Bakterien wäre der Frühstückstisch nicht so reich gedeckt. Ob die kleinen Helfer in den Fermentern der Lebensmittelindustrie auch gut arbeiten, zeigt eine neue Methode.

Von Katrin Schaller

Der Genuss einer Baguette mit Rotwein und Käse wäre undenkbar, wären hier nicht zuvor Mikroorganismen am Werk gewesen – jene winzigen Lebewesen, die Nahrungsrohstoffe zu kulinarischen Köstlichkeiten veredeln. So verwandeln Hefen Teig zu Brot und Saft zu Wein. Milch wird erst durch die Arbeit verschiedener Milchsäurebakterien zu Käse – die spezifische Zusammensetzung und Aktivität der kleinen Helfer entscheidet dabei über Geschmack und Qualität des Endprodukts. Deswegen kontrollieren die Produzenten ständig ihre Bakterien im Käse.

Diese wandeln als so genannte Starterkultur am Anfang des Fermentationsprozesses den Milchzucker in Milchsäure um; im sauren Milieu ballen sich dann die Milchproteine zu einem mehr oder weniger festen Käse zusammen. Das Aroma des Endprodukts entsteht hauptsächlich durch die Stoffwechselprodukte der Bakterien. Für eine gelungene Veredelung ist eine effektiv arbeitende Starterkultur besonders wichtig. Dazu müssen sich die Mikroben vermehren können und vor allem aktive Enzyme haben.

Um in der Käseproduktion die Lebensfähigkeit der Winzlinge zu testen, werden sie vereinzelt und dann auf Platten mit Nährmedium ausgebracht, wo sie dann innerhalb der folgenden zwei Tage zu Kulturen heranwachsen. Dieser Test ist umständlich und zeigt nur an, wie viele Mikroben in der Lage waren, sich zu vermehren. Wichtiger als die Teilungsfähigkeit ist aber ihre Enzymaktivität, und die ist manchmal durch ungeeignete Umgebungsbedingungen geschwächt. Diese Zellen erfasst der Plattentest jedoch nicht.

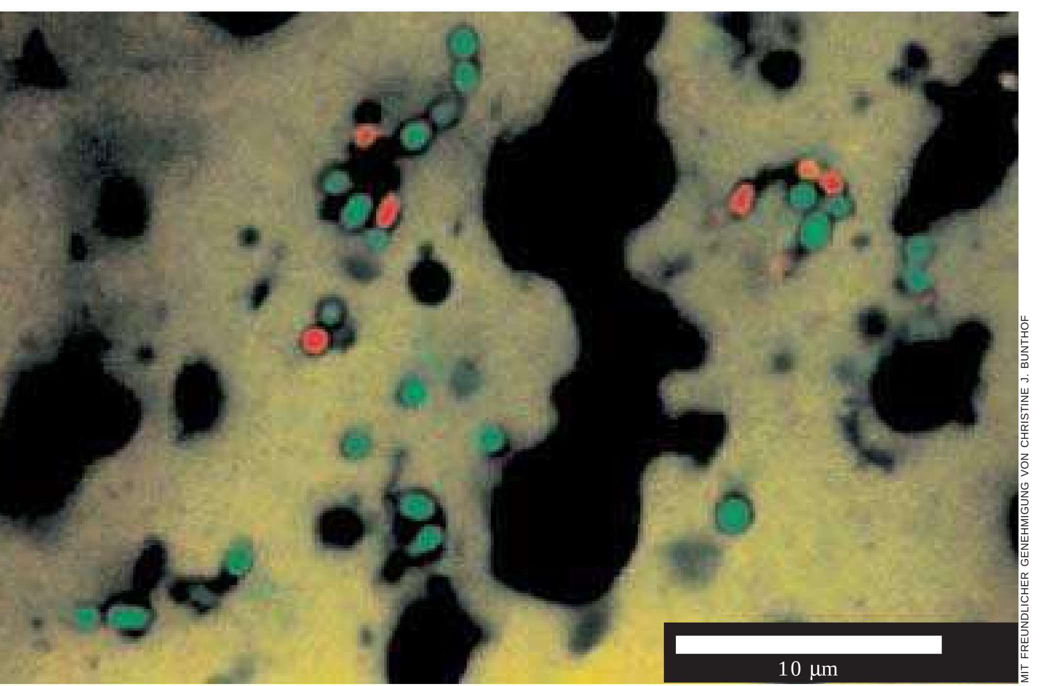
Ein schnelleres und differenziertes Verfahren dagegen detektiert auch diese Mikroben. Es wurde von Christine Bunthof und ihren Kollegen vom Laboratory for Food Microbiology der Universität Wageningen (Niederlande) in Zusammenarbeit mit dem Unternehmen NIZO Food Research entwickelt.

Bei der dazu eingesetzten Durchflusszytometrie werden die zu untersuchenden Zellen mit fluoreszierenden Farbstoffen markiert. Diese sind derartig konzipiert, dass sie sich jeweils an spezielle Strukturen binden und so Rückschlüsse auf bestimmte Zelleigenschaften ermöglichen. So gibt es Farbstoffe, die sich nur außen an lebenden Mikroben mit vollständiger Zellmembran heften. Oder solche, die ausschließlich tote Zellen markieren können, weil sie die geschädigte Zellhülle durchdringen müssen. Wieder andere Substanzen zeigen an, dass ein bestimmtes Enzym aktiv ist.

Die gefärbten Bakterien werden in eine geeignete Pufferlösung gebracht und in eine Messzelle geleitet. Dort zieht ein so genannter Hüllstrom die Lösung zu einem schmalen Flüssigkeitsstrom aus, in dem sich die Zellen wie auf einer Perlenkette aufreihen; dabei fließen sie einzeln an einer Lichtquelle, meist einem Laserstrahl, vorbei. Das Licht wird von den Zellen teils gestreut, teils von den Farbstoffen absorbiert, die daraufhin fluoreszieren. Zahlreiche Blenden und Filter leiten das gestreute beziehungsweise abgestrahlte Licht dann zu Detektoren, die ein elektrisches Signal erzeugen. Da auch Verunreinigungen in der Probe ein Signal auslösen, wird der Impuls nur dann ausgelöst, wenn das Signal eine bestimmte Schwelle überschreitet.

Das Ergebnis der Duchflusszytometrie ist aber nicht eine Abbildung einzelner Zellen, sondern eine Statistik. Der integrierte Computer stellt die gezählten Mikroben als Kurven oder Punkte (Histogramme) in unterschiedlichen Diagrammen dar. Auf dem Bildschirm können zur Datenanalyse einzelne Punktwolken eingekreist und danach ausgewertet werden. Der Computer gibt mit statistischen Werten wie Mittelwert und Standardabweichung den Anteil der Bakterien mit bestimmten Eigenschaften an der Gesamtpopulation an.

Einige Geräte bieten zusätzlich die Möglichkeit, zur weiteren Analyse oder Verarbeitung die Zellen entsprechend den mit Farbstoff markierten Eigenschaften zu trennen. Dazu werden zunächst auf dem Bildschirm die Mikroorganismen durch Einkreisen aus den Daten ausgewählt, die gesammelt werden sollen; der Computer identifiziert dann die gesuchten Zellen im Flüssigkeitsstrom der Messzelle und sortiert nach zwei Methoden: Einmal wird die Messzelle geschüttelt, sodass der Flüssigkeitsstrom mit den darin enthaltenen Zellen in einzelne Tröpfchen zerfällt, von denen – bei



MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON CHRISTINE J. BUNTHOF

Im Goudakäse leuchten nach der Einfärbung mit Fluoreszenzfarbstoffen lebende Bakterien grün und tote rot (Foto mit konfokalem Laser-Scanning-Mikroskop). Bei der Analyse im Durchflusszytometer zeigt sich, dass von den lebenden Mikroben nur etwa die Hälfte vermehrungsfähig ist und vom herkömmlichen Test erfasst wird.

entsprechender Verdünnung – etwa jedes zehnte eine Zelle enthält. Tröpfchen mit den gesuchten Mikroben werden elektrisch aufgeladen und in einem elektrischen Feld entsprechend ihrer Ladung abgelenkt und in getrennten Behältern aufgefangen. Bei der zweiten Sortiermethode werden nach Anweisung des Computers die gewünschten Zellen mit einem Röhrchen gesondert ausgeleitet und gesammelt.

So können in wenigen Minuten Tausende von Einzelzellen gemessen, gezählt und bei Bedarf zur Weiterverarbeitung sortiert werden. Für die Analyse der Milchsäurebakterien in der Käse- und Joghurtproduktion bedeutet das eine Verkürzung der Untersuchungszeit von zwei Tagen auf etwa eine Stunde. Der zeitaufwendigste und schwierigste Schritt ist dabei die Klärung der Milch. Denn für eine Analyse mit dem Durchflusszytometer müssen die Mikroben in absolut klarer Lösung vorliegen, da Verunreinigungen wie Milchproteine oder Fetttröpfchen das Ergebnis verschlechtern.

Ungeahntes Leben im Joghurt

Mit der von ihr entwickelten Methode entdeckte Bunthof in Starterkulturen zu jeweils etwa 50 Prozent tote und lebende Bakterien. Von den lebenden Individuen waren immerhin 35 bis 60 Prozent nicht vermehrungsfähig; diese greifen mit ihrer Enzymaktivität aber auch in den Fermentationsprozess ein. Da sie vom Plattentest nicht erfasst werden, ermöglicht die Durchflusszytometrie eine bessere Prognose über den Veredlungserfolg.

Das Verfahren hat zudem eine weitere Anwendung: Probiotische Joghurtbakterien sollen eine gesundheitsfördernde Wirkung haben – die optimale Dosierung ist aber noch nicht bekannt. Mittels Durchflusszytometrie konnten Bunthof und Kollegen zeigen, dass auch probiotische Kulturen in drei Aktivitätszuständen eine – je nach Produkt – unterschiedliche Zusammensetzung aufweisen.

Die Methode könnte dahin gehend weiterentwickelt werden, die Auswirkungen längerer Lagerzeiten auf die Aktivität probiotischer Mikroorganismen zu ermitteln. Auch die Passage durch den Darm hat Einfluss auf die Vitalität der Winzlinge, und die Zusammensetzung einer Mischkultur aus verschiedenen Bakterienstämmen kann sich dadurch verändern. Auch für die genaue Analyse dieser bisher wenig verstandenen Vorgänge bietet sich die Durchflusszytometrie an. ■

Katrin Schaller *ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Walldorf bei Heidelberg.*

BILDVERARBEITUNG

Stopp! Fußgänger!

Neuronale Netzwerke im Auto sollen querende Passanten in Sekundenbruchteilen erkennen.

Von Christian Wöhler

Eben noch ist die Fahrbahn frei, plötzlich rennt ein Kind auf die Straße. Selbst manch geübter Fahrer erstarrt in solch heiklen Situationen für einen kurzen, aber vielleicht entscheidenden Moment. Nicht so elektronische Systeme, sie kennen keine Schrecksekunde. Deshalb wollen Automobilhersteller ihre Fahrzeuge mit bildverarbeitenden Systemen ausstatten, die Fußgänger erkennen und den Fahrer warnen können; gegebenenfalls aktivieren sie selbst die Bremsen (Spektrum der Wissenschaft 05/2002, S. 76).

Allerdings ist das Erkennen von Menschen in der hochkomplexen Szenerie des Stadtverkehrs eine enorm schwierige Aufgabe, die bislang nur teilweise maschinell gelingt. Welche Glanzleistungen unser zentrales Nervensystem vollbringt, wird uns normalerweise nicht bewusst: In dem Strom von Signalen unserer Netzhaut unterscheidet es verschiedene Objekte, identifiziert sie als Verkehrsschilder, Menschen, Autos oder Gegenstände auf der Fahrbahn. Zudem erkennt unser Gehirn, ob und wie sich die klassifizierten Objekte bewegen. Diese Fertigkeiten mussten wir freilich erst im Laufe der Kindheit erlernen. Auch ein Computer lässt sich anhand von Beispielen darauf trainieren, aus den beiden Ansichten einer räumlich sehenden Stereokamera Objekte nach ihren charakteristischen Merkmalen zu klassifizieren.

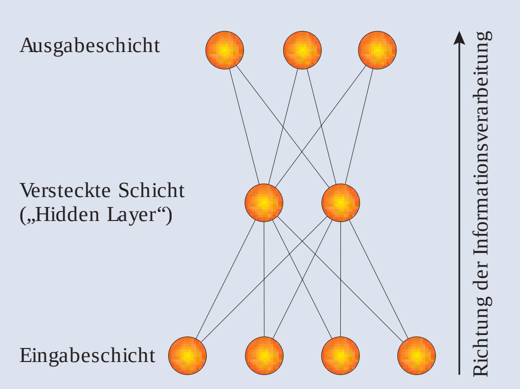
Unser Gehirn nutzt dazu das Zusammenspiel einer Vielzahl von Nervenzellen. Jedes dieser Neurone ist über Synapsen genannte Kontaktstellen mit anderen Neuronen verbunden. Die elektrischen Impulse, die es von seinen Partnern erhält, verrechnet die Zelle zu einem Gesamtpotenzial. Dabei wirken nicht alle Impulse in gleicher Weise, denn manche Synapsen erhöhen, andere senken das Potenzial. Liegt dieses schließlich über einem Schwellenwert, so erzeugt das Neuron ein Signal und gibt es weiter.

Einfache mathematische Modelle beschreiben diese Informationsverarbeitung durch eine zeitlich gemittelte Aktivität einer Zelle, die Feuerrate, die sich im einfachsten Fall als gewichtete Summe der mittleren Aktivitäten ihrer Nachbarneurone ergibt. Die biologische Wirklichkeit ist komplexer, doch als Basis technischer „neuronaler Netze“ eignet sich dieses Modell sehr gut.

Das biologische Vorbild gibt auch die Architektur eines solchen Netzes vor: Auf der Netzhaut des Auges und den dahinter liegenden Bereichen des visuellen Cortex dominiert nämlich eine Schichtstruktur, in der die Informationsverarbeitung überwiegend in einer bestimmten Richtung abläuft. Einer solchen Konfiguration entsprechen „Feedforward“-Netzwerke wie das Mehrschicht-Perceptron (siehe Grafik unten): Eine Schicht aus Eingabeneuronen speist den Input in das Netz, in unserem Falle sind das Intensitäten von Kamera-Bildpunkten. Jede folgende Schicht gibt ihre Antwort einer jeweils höheren weiter, bis eine Ausgabeschicht schließlich das Ergebnis anzeigt. Dass dabei nicht einfach ▶

Struktur eines Mehrschicht-Perceptrons

Neuronale Netzwerke imitieren die Informationsverarbeitung in biologischen Systemen. Beim Mehrschicht-Perceptron verläuft der Datenfluss nur in einer Richtung: Die „versteckte“ Schicht von Neuronen verarbeitet erhaltene Informationen und übermittelt ihr Ergebnis der nächsten Schicht, bis ein Ergebnis vorliegt.



ALLE BILDER DES BEITRAGS: DAIMLER CHRYSLER









Wie lassen sich Fußgänger von unbewegten Objekten unterscheiden? Beispielsweise anhand der Beinbewegung (oben). Deshalb verwertet das neuronale Netzwerk den entsprechenden unteren Abschnitt des Kamerabildes. Mit Erfolg, wie das eingeblendete Warnschild zeigt. Die erforderliche technische Ausrüstung nimmt derzeit noch erheblichen Platz ein (links). Die Stereokameras befinden sich beidseits des Rückspiegels, ein Display zeigt den Wissenschaftlern das Ergebnis der Berechnungen, der Computer arbeitet im Kofferraum.

ein Abbild der Eingabe-Informationen herauskommt, sondern eine Verarbeitung geschieht, beruht wie beim biologischen Vorbild auf unterschiedlich starken Verbindungen zwischen den Neuronen, realisiert durch Gewichte. Während solch ein Netz lernt, Beispiele zu klassifizieren, korrigiert es diese Gewichte in einer Vielzahl von Wiederholungen. Mathematisch gesprochen minimiert es eine über den gesamten Beispielsatz gemittelte Fehlerfunktion nach der Gradientenmethode. Anschaulich entspricht das dem Abstieg von einem Berggipfel – vom maximalen Fehler – ins Tal – zum minimalen Fehler –, wobei jeder Schritt in Richtung des jeweils größten Gefälles führt. Am Ende steht aber nicht nur die korrekte Wiedergabe der schon bekannten Beispiele. Die Netze können – wie lebende Nervensysteme – auch Informationen analysieren, die den Beispieldaten nur ähnlich sind: Präsentiert man ihnen mehrere Personen in heller Kleidung, erkennen sie nicht nur diese Personen wieder, sondern unterscheiden auch andere in heller Kleidung von sonstigen Objekten einer Straßenszene. Das klingt einfacher, als es ist, und so ein Training erfordert einige tausend bis zehntausend Lernbeispiele.

Ein neuronales Netzwerk für die Fußgängererkennung muss aber nicht nur Objekte auf Einzelbildern erkennen, sondern auch Bildfolgen im Zusammenhang verarbeiten. Konventionelle Videosysteme liefern aber etwa alle vierzig Millisekunden eine Aufnahme.

Ein Baum ist ein Baum

Die einzelnen Bilder einer Folge müssen deshalb innerhalb des Netzes aufgestaut werden, damit die aus ihnen extrahierten Merkmale alle gleichzeitig an der Ausgabeschicht ankommen. Das erste Bild wird also maximal verzögert, das letzte überhaupt nicht. Ein System, das Information zeitlich staffelt und dann im Kontext verarbeitet, heißt im Fachjargon Zeitverzögerungsnetzwerk oder TDNN (*Time Delay Neural Network*).

Die für das Sehen zuständigen Bereiche unseres Gehirns, der so genannte visuelle Cortex, weisen eine Besonderheit auf, von der wir ebenfalls lernen wollen: Eine Nervenzelle ist keinesfalls mit allen Neuronen der darunter liegenden Schicht verbunden, sondern nur mit einem kleinen Teilbereich, dem rezeptiven Feld (RF). Diese Gruppierung ermöglicht eine effektive Arbeitsteilung: Einige dieser Felder reagieren beispielsweise nur auf waagerechte Kanten im Bild, andere auf Bewegungen. Von Schicht zu Schicht werden die Merkmale komplizierter.

In eben dieser Weise haben wir das TDNN strukturiert. So erkennen manche der raum-zeitlich strukturierten rezeptiven Felder nach links gekippte elliptische Objekte, die sich von Bild zu Bild, also von Zeitschritt zu Zeitschritt, um zwei Pixel von links nach rechts bewegen, andere Felder der gleichen Neuronenschicht erkennen nach rechts gekippte Muster mit umgekehrter Bewegungsrichtung und so weiter. Je mehr wir uns in einem solchen Netz der Ausgabeschicht nähern, desto komplexer werden die Objektklassen und ihre Muster.

Ein solches Vorgehen ist auch durchaus notwendig, denn das Objekt

„Fußgänger“ variiert beispielsweise sehr stark in Form, Größe und Farbe. Neben individuellen Unterschieden sorgt zudem der jeweilige Blickwinkel der Kamera für Veränderungen. Ein mögliches Merkmal wäre „ein längliches Objekt, das zwischen 1,50 und 2,00 Meter groß ist“. Das genügt, um in den Einzelbildern einer Stereokamera dementsprechende Bereiche als *Regions of Interest* (ROIs) auszuzeichnen. Doch dieses Merkmal allein wäre nicht robust genug, denn es trifft beispielsweise auch auf viele Bäume und Sträucher zu.

Wenn ein Fußgänger über die Fahrbahn läuft, steuert er ein weiteres Merkmal bei, das die Treffsicherheit der Erkennung deutlich erhöht: das Muster der Beinbewegung – zwei längliche Objekte, die jeweils gegenläufig hin- und herschwingen (Fotos links oben). Deshalb trainierten wir unser TDNN auch mit Bildfolgen, die nur die untere Hälfte der ROIs enthalten. Mit Erfolg: Die Treffsicherheit stieg um den Faktor drei.

Eine gute Klassifikationsstrategie ist schon mehr als die halbe Miete, doch das Training der Netze hat eine ebenso hohe Bedeutung. Im Idealfall sollten die Lernbeispiele alle Ausprägungen aller möglichen Objekte vor allen vorkommenden Hintergrundmustern enthalten. Das lässt sich kaum realisieren. Hinzu kommen systematische Probleme: Die Kameraaufnahmen werden mit der Zeit den Trainingsmustern unähnlicher, denn die Elektronik altert, Helligkeit und Kontrast des Bildes schwinden.

Um solche Probleme ohne großen Aufwand zu bewältigen, muss das Netz lernfähig bleiben und sein Wissen automatisch durch Alltagserfahrung erweitern. Formal organisieren wir das so: Ein in einem Bild gefundenes Objekt erhält eine Identifikationsnummer, die konstant bleibt, solange das Objekt sichtbar ist. Wird es über eine festgelegte Zeitdauer hinreichend häufig als Fußgänger klassifiziert, übernimmt das System alle *Regions of Interest* mit dieser Identifikationsnummer als weitere Lernbeispiele. Gibt es genug solcher neuen Daten, legt es automatisch eine Trainingsrunde ein. Auf diese Weise erweiterten wir beispielsweise die Kenntnisse eines neuronalen Netzwerks, das ursprünglich mit Vorder- und Rückansichten dunkel gekleideter Fußgänger trainiert worden war. Zunächst lernte es, auch dunkel gekleidete Personen in der Seitenansicht zu erkennen, dann auch hell gekleidete Fußgänger. Die ursprünglich trainierten Muster wurden unverändert gut klassifiziert, zudem aber auch zehnmal mehr Seitenansichten als zuvor.

Die beschriebenen Methoden testen wir derzeit mit dem *Urban Traffic Assistant* im Innenstadtverkehr, weitere Entwicklungen erfolgen gemeinsam mit Siemens, VW sowie einigen mittelständischen französischen und englischen Firmen im Rahmen des EU-Projekts „SaveU“. An einer klassifikationsbasierten Fußgängererkennung arbeiten auch Kollegen am Artificial Intelligence Lab des Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambrigde. Sie verzichten allerdings auf eine Stereo-Bildanalyse



und unterteilen stattdessen die Pixel-Matrix in viele überlappende Teilbereiche, die ein Klassifikator anschließend dahin gehend prüft, ob sie eine Person enthalten oder nicht. Trotz deutlich höherer Rechenzeiten erlaubt auch dieses Vorgehen, wie bei unserem System die Kamera zu bewegen. Es gibt eine Reihe weiterer Klassifikationsverfahren, die aber bei den Zugangskontrollen eingesetzt werden: Sie vergleichen die Aufnahme einer stationären Kamera mit einem Referenzbild, eignen sich also nicht für den Einsatz im fahrenden Auto.

Einen völlig anderen Ansatz verfolgen modellbasierte Verfahren, die etwa explizit nach bestimmten Körperteilen suchen und aus diesen dann die Silhouette einer Person zusammensetzen. Teilweise verdeckte Personen oder solche, bei denen nur kurz einmal ein Arm oder Bein sichtbar ist, übersieht ein solcher Algorithmus. In komplexen Realwelt-Szenarien halten diese Techniken dem Vergleich mit den hier beschriebenen Verfahren deshalb nicht stand. Verlässlich arbeitet dagegen das von meinem Kollegen Dariu Gavrila entwickelte so genannte hierarchische Chamfer-Matching. Es extrahiert die Konturen von Fußgängern aus Aufnahmen und vergleicht sie mit Referenzkonturen. Dieses Verfahren ist prinzipiell sogar in der Lage, die ROIs auf Einzelbildern anstatt auf Stereo-Bildpaaren auszumachen, verlangt aber erhebliche Rechenleistung. Seine Stärken liegen in der Kombination mit der beschriebenen Stereo-Bildanalyse: Das Chamfer-Matching kann sehr schnell verdächtige Bildregionen ausfindig machen, die dann das neuronale Netz klassifiziert

So gut unser System schon ist, bis zu seinem Serieneinsatz muss es Fußgänger weitaus sicherer erkennen. Dazu müssen wir noch größere und die reale Welt noch besser wiedergebende Stichproben erzeugen; auch die Trainingsverfahren dürften sich verbessern lassen. Dann könnten diese Netze als Assistenzsysteme durch Lichtsignale oder Geräusche vor Passanten warnen und den Fahrer so in unübersichtlichen Verkehrssituationen unterstützen. Eine aktive Notbremsung gelingt zwar schon unter definierten Bedingungen auf dem Parkplatz unseres Forschungszentrums, der Serieneinsatz liegt – auch auf Grund der damit verbundenen Haftungsfragen – noch in ferner Zukunft. ■

Der promovierte Physiker ***Christian Wöhler*** *entwickelt Bildverarbeitungstechniken für Fahrerassistenzsysteme sowie für die Qualitätsprüfung in der Automobilfertigung am DaimlerChrysler-Forschungszentrum in Ulm.*

SICHERHEIT

Crash-Test für die Bahn

Auf der Schiene geht es immer hektischer zu, deshalb sollen Züge und Waggons künftig mit Knautschzonen und anderen Sicherheitssystemen ihre Passagiere schützen.

Von Edgar Lange

Fahr lieber mit der Bundesbahn, lautete ein Slogan vor wenigen Jahren. Doch als am 3. Juni 1998 mehrere Waggons eines ICE bei Eschede gegen eine Brücke prallten, starben 101 Menschen und 105 wurden zum Teil schwer verletzt. Weitere Zugunglücke im In- und Ausland erschütterten das Vertrauen in die Sicherheit dieses Verkehrsmittels. Zu Unrecht, wie die Statistik zeigt: So sind auf der Schiene im Mittel nur 0,7 Tote je Milliarde Personenkilometer zu beklagen, auf der Straße hingegen acht. Bei den Verletzten liegt das Verhältnis sogar bei 1:70. Doch die Verkehrsdichte auf dem deutschen Schienennetz hat seit 1990 um 22 Prozent zugenommen. Immer mehr Züge passieren zudem die Grenzen und durchqueren das zusammenwachsende Europa. Und jeder Tote ist ein Toter zu viel.

Neue Sicherheitsrichtlinien tun Not. Das derzeit noch gültige Regelwerk des Internationalen Eisenbahnverbandes UIC für die Festigkeit von Lokomotiven, Triebwagen und Waggons stammt aus dem Jahre 1974. Deshalb schlossen sich 16 Partner aus den Bereichen Bahn, Industrie und Wissenschaft zum Forschungsverbund „Safetrain“ zusammen, entwickelten Mindestanforderungen an die Kollisionsfestigkeit sowie den Insassenschutz der Fahrzeuge und veranstalteten spektakuläre Crash-Tests auf einem Gelände des polnischen Bahnforschungszentrums in der Nähe von Breslau. Zum ersten Mal überhaupt wurden Mindestanforderungen an die Kollisionssicherheit und den Insassenschutz neuer Schienenfahrzeuge festgeschrieben und fanden Eingang in eine Euro-Norm. Damit wird künftig eine bei Automobilen längst selbstverständliche „Knautschzone“ auch bei Eisenbahnen europaweit Pflicht.

Den Crash-Tests ging eine Analyse von 300 Unfällen der Jahre 1991 bis 1995 voraus. Bei gut einem Drittel war ein Zug mit einem Auto oder LKW auf einem Bahnübergang zusammengestoßen, bei knapp einem Viertel auf ein anderes Schienenfahrzeug aufgefahren. Bei immerhin zehn Prozent der Fälle waren Loks oder Waggons frontal aufeinander geprallt.

Diese Daten stellten die Forscher in Rechnung und verbesserten die Sicherheit der so genannten Wagenkästen, also der tragenden Konstruktion eines Schienenfahrzeugs: Sie soll künftig Energie beim Aufprall aufnehmen und abführen können, statt starr zu sein und diese als Beschleunigung an die Passagiere weiterzugeben. Auch Energieabsorber an den Kupplungen zwischen Lokomotive und Waggon beziehungsweise zwischen zwei Waggons sowie spezielle Inneneinrichtungen waren Themen bei Safetrain.

Prototypen sicherer Züge absolvierten drei typische Bahnunfälle auf dem polnischen Testring: Ein 129 Tonnen schwerer Regionalbahnzug kollidierte bei Tempo 100 mit einem 16,5-Tonnen-Laster auf einem Bahnübergang; derselbe Zug fuhr mit 36 km/h auf ein 80-Tonnen-Triebfahrzeug auf und als „Höhepunkt“ prallten zwei derartige Regionalbahnen frontal zusammen.

„Eigentlich hatten wir befürchtet, die Wagen wären nach dem Test nur noch Schrott“, gesteht Wilfried Wolter vom Forschungs- und Technologiezentrum der Deutschen Bahn in Brandenburg-Kirchmöser. Doch die Schäden waren so gering, dass beide Fahrzeuge sogar zu reparieren gewesen wären. Die Zugführer hätten überlebt. Die Forderung, dass die neuen Konstruktionen 4,6 Megajoule Aufprallenergie in Verformungsarbeit



BOMBARDIER / DEUTSCHE BAHN



„Pufferhörner“ sollen verhindern, dass ein Zug beim Crash auf das Hindernis aufklettert und somit entgleisen kann. Sie verbergen sich in der gelb verkleideten, vorstehenden Struktur. Das silberne Paket auf diesen Puffern besteht aus einer Wabenstruktur, die durch Verformung und Nach-hinten-Gleiten Energie absorbieren soll. Die Simulation eines Aufpralls auf einen Lkw an einem Bahnübergang mit 100 km/h zeigt, dass der Lokführerstand tatsächlich unversehrt bleibt (oben: Vorbereitung, links: nach dem Test).

umsetzen und die Fahrzeuge nicht entgleisen sollten, wurde voll erfüllt. „Wir haben viel darüber gelernt, wie durch konstruktive Merkmale Kollisionsfolgen sowohl für die Menschen im Zug als auch für die Fahrzeuge selbst deutlich begrenzt werden können“, resümiert Wolter.

Zur Safetrain-Lösung gehören auch Vorrichtungen, die das so genannte Aufklettern verhindern: Oft schiebt sich bei einem Zusammenstoß ein Fahrzeug an dem anderen hoch, beide entgleisen und kippen. Das aber hat dann meist schlimmere Folgen als der eigentliche Crash. Als Gegenmittel dienten spezielle Pufferhörner, die, wie in der Computersimulation berechnet, im Versuch tatsächlich die konventionellen Puffer eines Test-Güterwagens vollständig umfassen und damit das Aufklettern verhinderten.

Flucht nach hinten

Die Crash-fähigen Strukturen der Prototypen erlaubten eine kontrollierte Verformung des Fahrzeugkopfes nach einem Drei-Stufen-Modell: Zunächst fingen mit Stauchrohren versehene Kupplungen kleinere Aufprallkräfte ab und federten anschließend wieder in ihre Ursprungslage zurück. Danach falteten sich spezielle Energieabsorber wie eine Ziehharmonika und vernichteten so weitere Bewegungsenergie. In den Versuchen waren zu diesem Zeitpunkt bereits drei Viertel der zerstörerischen Kräfte unschädlich gemacht. Stufe drei schließlich schluckte auch den Rest der Kollisionsenergie: Knautschzonen in den Wagenkasten-Enden und im Frontbereich. Führerstände und Fahrgasträume blieben innerhalb eines definierten Kräftespektrums unversehrt. „Wo heute noch mit Schwerverletzten zu rechnen ist, werden Passagiere künftig nur leichte Verletzungen davontragen“, prophezeit DB-Projektchef Wolter. Weil auf Jahrzehnte hinaus noch ältere Bahnfahrzeuge auf europäischen Gleisen unterwegs sein werden, will man diese zumindest mit den neuen Pufferhörnern aufrüsten. Neufahrzeuge erhalten schon heute Stauchrohre hinter den Kupplung.

Eine von der Bahn und dem Unternehmen Bombardier zum Patent angemeldete Sitzbefestigung verhindert darüber hinaus das Einklemmen des Zugführers: Führerpult und Sitzgestell sind so miteinander verbunden, dass sich die Abstände nicht verringern, wenn sie bei einem Aufprall gemeinsam nach hinten, also in Richtung Fahrgastraum, gedrückt werden. Der Triebfahrzeugführer, der im Übrigen durch einen Gurt oder einen Airbag am Führerstand gesichert werden kann, wird im schlimmsten Fall auf seinem Sitz mit nach hinten gedrückt. „Wichtig ist dabei“, so Wolter, „dass ihm ein Fluchtweg nach hinten bleibt.“

Weil sich die eigentliche Fahrgastzelle nur wenig verformt, erhöht sich die Sicherheit der Passagiere. Verformbare Sitze, Anschnallgurte und Airbags sind in der Diskussion. Ein Ergebnis der Crash-Tests zeigte zudem, dass eine Anordnung der Sitze hintereinander den größten Schutz bei Unfällen bietet.

Im Anschlussprojekt „Safetram“ soll nun auch die passive Sicherheit leicht gebauter Schienenfahrzeuge des Regionalbahnverkehrs verbessert werden. Denn Stadtbahnzüge fahren immer häufiger im Mischverkehr auf Schienen der großen Kollegen. Beispielsweise wechselt die S-Bahn im Großraum Saarbrücken von den innerstädtischen Gleisen auf DB-Schienen und fährt sogar über die deutsche Grenze bis nach Sarreguemimes ins französische SNCF-Netz. Bei Unfällen nimmt aber das leichtere Fahrzeug die gesamte Kollisionsenergie auf. Ein Crash zwischen Straßenbahn und Reisezug hätte kaum auszumalende Konsequenzen. ■

Edgar Lange *ist Elektroingenieur der Energietechnik. Nach Tätigkeit in der Industrie arbeitet er heute als freier Fachjournalist Technik.*

AM RANDE

Rücksturz zur Erde – Ferrari, McLaren und die Esa

Rot, stark, gut! Rosso Corsa, das berühmte Ferrari-Rot, ist strahlendes Symbol für technische Potenz. An Bord der Raumsonde Mars Express wird im kommenden Jahr eine winzige Probe davon mit zum Roten Planeten fliegen. Doch wozu? Um die Farbe fit zu machen für neue Rundenrekorde bei Tempo 10 000? Keineswegs. Es geht um Werbung für Weltraum und Wissenschaft: Während die internationale Raumstation ISS im Schwerefeld irdischer Finanzen ins Trudeln gerät, startet die europäische Raumfahrtagentur Esa Ablenkungsmanöver auf Bodenhöhe.

Auf dem Pariser Autosalon im Oktober verkündete sie die überraschende Botschaft: Ohne Spin-offs der bemannten Raumfahrt gäbe es keine Airbags und somit wohl mehr Unfalltote, ohne Sonnenforschung via Satellit hätten Solarautos keine Zukunftschance. Der Technologieschub aus dem All hält selbst die Formel 1 in Gang: Ohne von Astronauten erprobte Kühlsysteme würden McLaren-Mechaniker in ihren feuerfesten Anzügen wohl vor sich hin sieden. Welches Himmelsgeschenk plant die Esa als Nächstes? Mehr Platz für Koffer dank Raum-Forschung?

Derweil geht der ISS der finanzielle Treibstoff aus: Die Russen haben sowieso kein Geld, die Nasa fliegt auf Sparkurs und Hans Eichel kämpft gegen Schwarze Löcher im Haushalt. Ein halbleerer Tank aber reicht gerade mal, um das fliegende Labor in der dünnen Luft zu halten: Der wirtschaftliche und wissenschaftliche Totalschaden der ISS-Mission ist absehbar.

Ob sanfte Landung über die Jahre hinweg oder jäher Absturz: Dass sich die Esa in Paris ein neues Image verpassen will, wirkt verständlich. Vielleicht hat sie ja auch eine neue Perspektive gefunden und überrascht nun die Welt mit tiefer gelegten Abschussrampen und verbreiterten Triebwerken für sportlicheren Raketensound. Schöner wäre es, sie hätte an einem ihrer Nachbarstände gelernt, wie ein zeitgemäßes Erfolgskonzept auch lauten könnte: Klein, aber Smart.

Die bemannte Raumfahrt erschließt neue Märkte.

Der Autor ***Thilo Körkel*** ist Physiker und Wissenschaftsjournalist in Frankfurt.

ZAHNTECHNIK

Der Virtuelle Artikulator

Kronen, Brücken, Inlays und Onlays müssen sich perfekt in das natürliche Gebiss einpassen. Derzeit fertigt der Zahntechniker Gipsabdrücke von Ober- und Unterkiefer, spannt sie in eine Artikulator genannte Vorrichtung und simuliert Kiefer- und Kaubewegungen. Blaupapier, fachlich Okklusionspapier, färbt den Gips an Kontaktstellen.

Die mechanische Vorrichtung imitiert die Verhältnisse beim Patienten freilich nur sehr grob. Ohnehin verrät das Verfahren nicht, wie sich die Zahnkontakte im Laufe einer Kaubewegung verändern. Wissenschaftler des Fraunhofer-Instituts für Graphische Datenverarbeitung in Darmstadt, der Universitätsklinik Greifswald und des Medizintechnik-Unternehmens Kettenbach in Eschenburg entwickeln deshalb einen „Virtuellen Artikulator“, der patientenspezifische Vorgänge wie das Vorschieben des Unterkiefers im Detail simuliert und auf einem Monitor darstellt.

Als Datenbasis dienen Ultraschall-Messungen individueller Bewegungsmuster. Dazu klebt der Zahnarzt mit einem für den Mundraum zugelassenen Sekundenkleber Ultraschallsensoren an den Unterkiefer, deren Positionen relativ zu einem Referenzpunkt an der Stirn während der Kaubewegung gemessen werden. Die Bewegungen der Messpunkte werden auf Kiefermodelle übertragen, die zurzeit noch durch einen räumlichen Scan konventionell gefertigter Gipsabdrücke entstehen. Künftig sollen intraorale Kameras solche Daten direkt im Mund des Patienten erheben.

Bei der anschließenden Bewegungssimulation berechnet die Software, an welchen Stellen einander gegenüberliegende Zähne Kontakt haben, und stellt diese Flächen rot dar. Auch Punkte, die sich lediglich sehr nahe kommen, hebt das Programm farblich hervor. Der Zahntechniker kann verfolgen, wie sich Kontaktpunkte beim Kauen über die Zahnhöcker bewegen.



FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR GRAPHISCHE DATENVERARBEITUNG, DARMSTADT

Was im Maschinenbau längst gängige Praxis ist, soll nun auch in der Zahntechnik Einzug halten: Grafische Ansichten von Ober- und Unterkiefer (grün beziehungsweise blau) nach einer Kausimulation. Kontaktpunkte sowie Oberflächenbereiche, die einander sehr nahe kommen, werden andersfarbig hervorgehoben.

Letztlich soll die gesamte Fertigungskette von Zahnersatz digitalisiert, der Virtuelle Artikulator schon beim Design verwendet werden. Als digitaler Datensatz lässt sich eine Krone dann von einer computergesteuerten Fräsmaschine aus Vollkeramik fertigen und muss nur noch in einem Ofen gesintert werden. Das Ziel sind höhere Qualität der Produkte, ein abgekürzter Herstellungsprozess und geringere Kosten.

MIKROWELLEN

Mit Hitze Löcher bohren

Handwerker im Haus sind der Schrecken der Nachbarschaft: Beim Bohren vibrieren die Wände, das Haus dröhnt und der Staub kriecht in alle Ecken. Eine vibrations- und staubfreie, leise und zudem kostengünstige Alternative haben Eli Jerby und seine Mitarbeiter von der Tel Aviv University mit dem Mikrowellenbohrer entwickelt. Sein Prinzip: Er bündelt am Ende einer Antenne die Mikrowellen zu einem winzigen heißen Punkt, der das zu durchbohrende Material erhitzt und dadurch erweicht – vorausgesetzt, der Schmelzpunkt des Objekts liegt unterhalb von 2000 Grad Celsius. Die Antennenspitze sticht dann das Loch in das geschmolzene Material. Die Wissenschaftler bohrten bereits still und schmutzfrei zwei Zentimeter tiefe Löcher von einem halben bis zu zehn Millimeter Durchmesser in Keramik, Basalt, Glas und Silikon. Ein großer Nachteil ist die gefährliche Strahlung des Geräts – deswegen wird es wohl zunächst dem professionellen und industriellen Einsatz vorbehalten bleiben. Schutz vor der Strahlung bietet entweder ein Gehäuse wie beim herkömmlichen Mikrowellenofen oder eine einfache Schutzplatte. (*Science, S. 587, 18.10.2002*)



SCIENCE / ELI JERBY

Sekundenschnell schmilzt sich der Mikrowellenbohrer in eine Glasplatte.

ELEKTRONIK

Selbstorganisierte Nanodrähte

Aus einer Suppe von verzweigten Polymeren (Kettenmolekülen) und organischen Molekülen kochte ein internationales Team um Virgil Percec von der University of Pennsylvania elektrisch leitende und rundum isolierte Zylinder im Nanoformat. Damit ist es den Forschern erstmals gelungen, leitfähige Moleküle mit isolierenden organischen Molekülen zu einem Material mit neuartigen elektronischen Eigenschaften zu verbinden. Dazu hängten sie an verzweigte Polymere Elektronen-Donator- oder Elektronen-Akzeptor-Gruppen an. Durch Selbstorganisation umwickelten die Kettenmoleküle den leitfähigen Kern mit einer schützenden Hülle, bis Zylinder aus bis zu 1000 Nanometer Länge und 10 Nanometer Durchmesser entstanden. Sie standen dicht gepackt senkrecht zur Oberfläche. Mit dieser einfachen und billigen Methode lassen sich Zylinder einzeln und in großen Verbänden herstellen. Sie könnten als Bauteile in Solarzellen oder als optische Schalter Verwendung finden. (*Nature, S. 384, 26.9.2002*)



MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR POLYMERFORSCHUNG

Durch Selbstorganisation entstehen winzigste Kabel.

ELLIPTEC RESONANT ACTUATOR AG

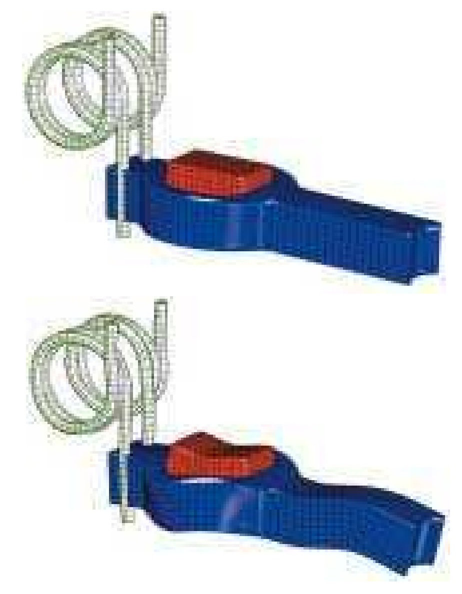
Die Kunst des Gleitens

Besucher der diesjährigen internationalen Spielwarenmesse in Nürnberg machten große Augen. Der Grund: Eine neue Spielzeuglok, die ihren Stromabnehmer so fließend hebt und senkt wie ihre erwachsenen Vorbilder. Des Rätsels Lösung ist ein Minimotor mit Piezo-Antrieb der Elliptec Resonant Actuator AG. Da er keinen Rotor benötigt wie ein herkömmlicher Elektromotor, muss beim Bremsen kein Schwung abgebaut werden. Deshalb stoppt der Antrieb nach dem Ausschalten 60-mal schneller als sein summender Konkurrent. Sein Bremsweg ist sogar 2000-mal kürzer, seine Präzision ungleich höher, der Preis aber in etwa gleich. Im lukrativen Spielwarenmarkt dürfte sich deshalb so manche Anwendung finden, etwa rollende Augen und wackelnde Ohren animierter Bären, Puppen oder Plastikhündchen. Doch wo auch immer Kleinteile mit wenig Kraftaufwand präzise, gleitend und zu geringen Kosten zu bewegen sind, möchte die Firma ihre Piezo-Antriebe platzieren, etwa in Haushaltsgeräten, Kameras, Druckern oder CD-Laufwerken.

Ganz neu sind solche Motoren nicht, schon seit einigen Jahren arbeiten Piezo-Antriebe beispielsweise in der Chipfertigung. Doch kosteten sie bis zu 400 US-Dollar, komplette Positioniersysteme sogar einige tausend. Erst den Forschern von Siemens, Epcos und Elliptec ist es gemeinsam gelungen, Konstruktion, Bauteile und Herstellung so stark zu vereinfachen, dass der Stückpreis auf zwei bis vier US-Dollar sank.

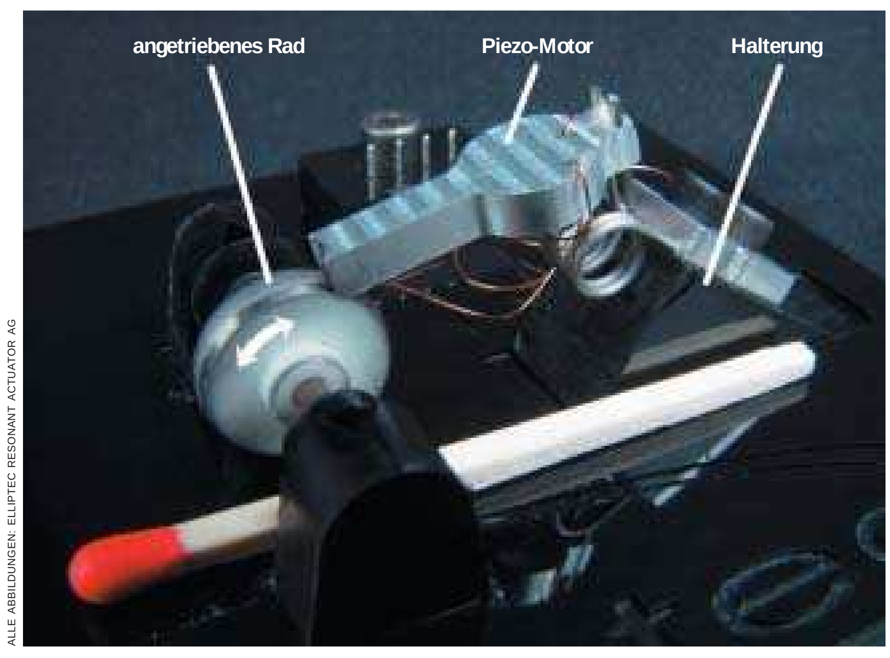
Ein Mikrocontroller sowie ein einziger Transistor genügen, um die Piezo-Keramik mit elektrischer Spannung zu versorgen. Nach dem Einschalten dehnt sie sich um weniger als einen Mikrometer aus, nach dem Ausschalten zieht sie sich wieder zusammen (zum Piezo-Effekt, siehe Spektrum der Wissenschaft 01/2002, S. 110). Je nach Anwendung findet dieses Wechselspiel „Ausdehnen – Zusammenziehen“ zwischen 50 000- und 100 000-mal pro Sekunde statt. Das schnelle Ausdehnen und Zusammenziehen der Piezo-Keramik wird auf einen schlüsselförmigen Resonator übertragen und versetzt ihn in Schwingung. In Computersimulationen und Praxistests haben die Forscher von Elliptec seine Form so optimiert, dass die Schwingung verstärkt wird und die Motorspitze ellipsenförmige Bewegungen mit ein bis zwei Mikrometer großen Amplituden ausführt (daher auch der Firmenname). Weil die Keramik aus sehr vielen, jeweils etwa dreißig Mikrometer dünnen keramischen Schichten und Elektroden im Wechsel aufgebaut ist (Multilayer), reichen sechs bis acht Volt. Ein so genannter Monolayer brauchte für die gleiche Auslenkung fast tausend Volt.

Eine am Motor befestigte Stahlfeder drückt die Spitze gegen das anzutreiben-



Die Verformung des Piezo-Kristalls (rot) überträgt sich auf den Resonator (blau), der mit den Federn (grün) auf das Stellglied drückt und es damit bewegt.





Fließende Bewegungen der Stromabnehmer erhöhen die Wirklichkeitsnähe dieser Spielzeuglok (oben). Für solche Bewegungen sorgt der Piezo-Antrieb, der in die Modelleisenbahn eingebaut ist.

Das Unternehmen im Profil

Die Elliptec Resonant Actuator AG mit Sitz in Dortmund wurde im Januar 2001 von Dr. Björn Magnussen und seinem Team gegründet. Die Firma Siemens hält gegenwärtig 24,9 Prozent der Unternehmensanteile – der ehemalige Siemensmitarbeiter Magnussen hatte das Motorkonzept im Konzern bis zum Prototyp entwickelt. Derzeit beschäftigt das Start-up-Unternehmen zwölf Mitarbeiter und wird durch einen externen Experten in Berkeley (Kalifornien) unterstützt.

Weitere Informationen unter *www.elliptec.com*

de Element. Mit jeder Ellipse, die die Spitze ausführt, wird dieses Element nach vorne geschoben beziehungsweise zurückgezogen, und zwar mit Geschwindigkeiten von 15 Zentimetern pro Sekunde und mehr. Solche Werte fordert beispielsweise die Automobil- und Elektronikindustrie, um die Lüftung der Klimaanlage oder die Schublade des CD-Spielers zu öffnen oder zu schließen. Die Mikrometer-Schrittweite sorgt für quasifließende, bei Bedarf auch für langsame Bewegungen. Einem Elektromotor hingegen fällt dergleichen deutlich schwerer: Er dreht sich zunächst gar nicht und fährt dann mit einer gewissen Geschwindigkeit los, daher auch seine – allerdings kaum sichtbaren – ruckartigen Bewegungen.

Um zu untersuchen, inwieweit Computersimulationen mit der Realität übereinstimmen, verwenden die Forscher ein so genanntes Scanning-Laservibrometer. Dieses Messgerät tastet die Oberfläche des Motors mit einem Laserstrahl ab und erfasst dabei die Geschwindigkeit, mit der sich die Oberflächenpunkte bewegen. Aus den Daten berechnet eine spezielle Software Bilder der Schwingungsmodi und spezifische Motoreigenschaften.

Der Technologievorsprung beträgt laut Unternehmen mindestens zwei Jahre. Die erste Serienfertigung der Minimotoren ist im Juni dieses Jahres in Kooperation mit der Ceramics GmbH in Dortmund angelaufen. Derzeit sind die Stückzahlen noch gering – das Unternehmen hofft auf Großaufträge aus der Spielzeug- oder Automobilindustrie.

Ulrike Zechbauer

Die Autorin ist Wissenschaftsjournalistin in München.

KULTURGESCHICHTE

Himmelsscheibe, Keltenfürsten

Archäologische Forschung hat mehr zu bieten als Pergamon, Pompeji und Pyramiden: Spektakuläre Funde in Deutschland und hier entwickelte Verfahren zeichnen ein neues Bild europäischer Geschichte.

Von Matthias Mochner

Archäologie – wer denkt da nicht an Heinrich Schliemann, der Troja und Mykene ausgrub, den „Schatz des Priamos" und die „Maske des Agamemnon" fand und damit antike Orte und Personen aus dem nebligen Reich der Mythen in die begreifbare, reale Welt überführte? Oder an C.W. Cerams „Götter, Gräber und Gelehrte", den wunderbaren Roman der Archäologie, der seit fünfzig Jahren die Neugier einer breiten Öffentlichkeit an den spannenden Abenteuern der Archäologie weckt?

Es ist diese Mischung aus spektakulären Funden und Einblicken in unsere kulturelle Vergangenheit, die das Faszinierende an der Archäologie ausmacht. Die Artefakte, die Archäologen aus den unterschiedlichsten Zeiten und Räumen der menschlichen Entwicklungsgeschichte ans Licht holen, liefern die materielle Basis, aus der die Lebensverhältnisse unserer Ahnen rekonstruiert werden können. Auf jene Weise erhalten und ergänzen die Archäologen unser kulturelles Gedächtnis. Dennoch ist das Bild dieser Wissenschaft in der Öffentlichkeit ambivalent.

Denn hartnäckig haftet der Archäologie einerseits der Mythos an, vor allem nach kostbaren Objekten aus Edelmetall zu graben, also Schätze zu suchen. Andererseits hat sich die Archäologie aufgrund der rasanten Entwicklung spezieller Grabungstechniken (wie etwa der Fotogrammetrie) sowie differenzierter Restaurierungs- und Untersuchungsmethoden schon seit langem von eben diesem Klischee emanzipiert. Einzelne, in Deutschland entwickelte Verfahren wie etwa die geomagnetische Prospektion, gehören inzwischen zum internationalen Standard der Archäologie. Doch sind die bemerkenswerten Errungenschaften der archäologischen Forschung mit jeder Präsentation von Artefakten stets aufs Neue der Gefahr ausgesetzt, in der Öffentlichkeit auf eben diesen Mythos der Schatzsuche reduziert und damit verkannt zu werden.

Phänomenaler Erkenntnisgewinn

Tatsächlich ist die Archäologie heute aufgrund jahrzehntelanger Arbeit, dem Einsatz komplexer Technologien (wie beispielsweise dem Laserpantographen) sowie interdisziplinärer Forschungsprojekte bestens in der Lage, genaue Aussagen über die Kultur- und Entwicklungsgeschichte des Menschen zu treffen. Sie gewährt Einsichten in unsere Vergangenheit, die noch vor wenigen Jahren undenkbar gewesen wären. Dabei zeigt sich, dass insbesondere das Bild der europäischen Frühgeschichte nicht nur in wesentlichen Punkten präzisiert, sondern teilweise sogar korrigiert werden konnte. Denn Archäologie ist nicht nur die Wissenschaft von den frühen Hochkulturen im Mittelmeerraum. Dass sie mehr zu bieten hat als Pergamon, Pompeji und Pyramiden, haben Aufsehen erregende Funde auf deutschem Boden in jüngster Zeit verdeutlicht.

Einen geradezu phänomenalen Erkenntnisgewinn erbrachten beispielsweise Luftbildprospektionen, die ab 1990 in den neuen Bundesländern durchgeführt wurden. Aufgrund der gegenüber Westdeutschland verschiedenen Bewirtschaftung riesiger landwirtschaftlicher Areale konnten die Wissenschaftler hier mehrere hundert Kreisgrabenanlagen und spätkeltische Viereckschanzen relativ leicht aus der Luft identifizieren. Während die Archäologen diese Viereckschanzen noch vor etwa zehn Jahren als Tempelanlagen mit Opferhäusern deuteten, so führte ihre massenhafte Entdeckung nun zur Erkenntnis, dass derartige Anlagen sowohl als Lagerplatz für Waren, als Zufluchtsort für Mensch und Vieh, aber auch als Wohnplatz dienten. Offenbar waren diese Gebiete stärker besiedelt als bislang angenommen.

Auch das vertraute Bild der Völkerwanderung erweist sich heute als zu allgemein – zeigen doch archäologische Forschungen mehr und mehr, dass trotz etlicher kriegerischer Konflikte durch alle Zeiten eine Kontinuität der Bevölkerung vorherrschte. Vor diesem Hintergrund sowie der Tatsache, dass der römische Limes keine feste Kulturscheide war, lässt sich sehr gezielt nach den Vorgängen der Romanisierung Mitteleuropas fragen.

In der Bundesrepublik Deutschland ist die Anzahl bekannter archäologischer Plätze seit 1975 – dem Jahr der letzten umfassenden archäologischen Gesamtschau in Deutschland – gewaltig angewachsen und wird auf gegenwärtig über

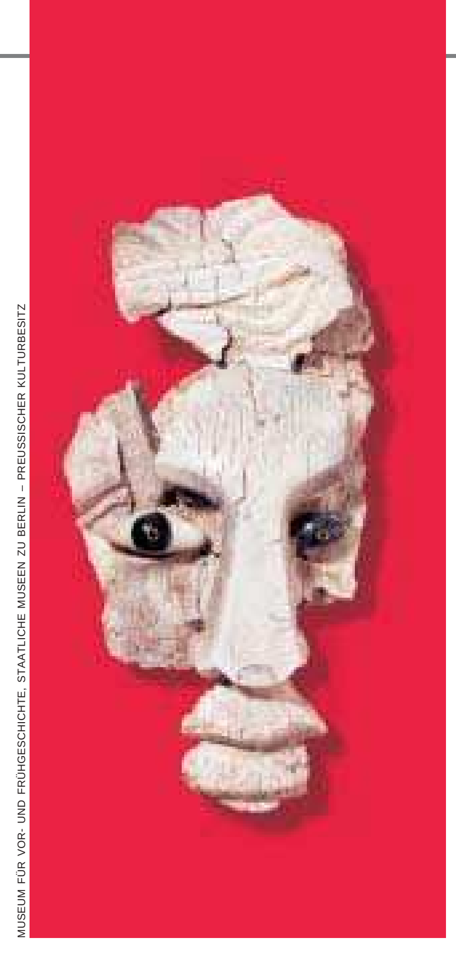
Auf dieser mit Rollen ausgestatteten Bronzeliege wurde der Tote aufgebahrt, den man im Fürstengrab von Hochdorf fand (siehe auch Detailbild auf Seite 103).



WÜRTTEMBERGISCHES LANDESMUSEUM STUTTGART



TH. STEPHAN, ULMER MUSEUM



MUSEUM FÜR VOR- UND FRÜHGESCHICHTE, STAATLICHE MUSEEN ZU BERLIN – PREUSSISCHER KULTURBESITZ



C. PLAMP, MUSEUM FÜR VOR- UND FRÜHGESCHICHTE, STAATLICHE MUSEEN ZU BERLIN – PREUSSISCHER KULTURBESITZ

Der aus Elfenbein geschnitzte „Löwenmensch", gefunden im baden-württembergischen Lonetal, ist rund 30 000 Jahre alt (links), das aus Knochen gearbeitete Gesicht aus einem Römergrab im nordrhein-westfälischen Haltern hingegen nur 2000 Jahre (oben). Der 75 Zentimeter hohe „Berliner Goldhut" aus papierdünnem, nahtlos getriebenem Goldblech stammt aus der späten Bronzezeit und diente vermutlich kultischen Zwecken (rechts); seine Verzierungen aus Buckeln und Kreismustern werden als Kalender gedeutet.

350 000 veranschlagt. Die Zahl der noch unbekannten archäologischen Fundstellen dürfte freilich um ein Vielfaches höher liegen. Jedes Jahr werden Tausende von Bodendenkmälern entdeckt.

Der wissenschaftlichen Aufarbeitung hierbei anfallender immenser Daten- und Fundmengen sind inzwischen allerdings immer öfter finanzielle Grenzen gesetzt. Statistisch gesehen können sogar nur zwei bis fünf Prozent der durch Baumaßnahmen bedrohten archäologischen Plätze rechtzeitig ausgegraben werden. Die rund 2000 hauptberuflichen Archäologinnen und Archäologen in Deutschland stehen hierbei in ständigem Wettlauf mit der Zeit.

Wendepunkte der archäologischen Forschung in den vergangenen 25 Jahren in Deutschland markieren – neben vielen anderen – die bedeutenden Funde aus der Keltenzeit: das Fürstengrab in Hochdorf an der Enz (Baden-Württemberg), das 360 Hektar große Oppidum von Manching an der Ilm (Bayern) sowie die vier Statuen vom Glauberg (Hessen) und die dort entdeckte lange Prozessionsstraße, der nördlich der Alpen nichts Vergleichbares entgegenzustellen ist (vergleiche Spektrum der Wissenschaft 05/2002, S. 96). Als bahnbrechend erwiesen sich jene Projekte vor allem auch deshalb, weil bei ihnen neue archäologische Methoden und Techniken erfolgreich zum Einsatz gelangten, die bei Grabungen nur wenige Jahre später dann bereits selbstverständlich waren wie etwa das Prinzip der Blockbergung.

Im Laufe der letzten 25 Jahre konnte so das Bild der europäischen Frühgeschichte durch bedeutende Funde kontinuierlich erweitert werden. Hierzu gehören die beiden 7000 Jahre alten Tiefbrunnen in den linearbandkeramischen Siedlungen von Eythra (Sachsen) und Erkelenz (Nordrhein-Westfalen) ebenso wie die Funde bei Kalkriese (Niedersachsen), anhand derer der Ort der legendären Varusschlacht identifiziert werden konnte, und die mehr als 600 heute bekannten slawischen Burganlagen zwischen Elbe und Oder.

Mit der Vielzahl der materiellen Zeugnisse einhergehend gelangten erstmals auch Fragen nach den Vorstellungen, die sich Menschen zu verschiedenen Zeiten und Orten über das Jenseits bilde- ▶



Die rund 3600 Jahre alte „Himmelsscheibe von Nebra" ist die älteste bekannte naturalistische Darstellung des Sternenhimmels. Die einzigartige Bronzescheibe, 1999 von Schatzgräbern entdeckt, konnte mittlerweile wissenschaftlich untersucht und ihrem Fundort zugeordnet werden.

ten, in den [illegible]ogen. Anhand der Beigabensitten in den Gräbern ließen sich, wenngleich keine Beweise, so doch immerhin vielfältige diesbezügliche Einsichten gewinnen. Vierrädrige Wagen in keltischen Gräbern und kleine Wagenmodelle könnten auf die auch aus der Antike bekannte Vorstellung einer Überfahrt der Seele in das Reich der Toten hindeuten. Ein in Manching gefundenes, mit Blattgold überzogenes Kultbäumchen – es zeigt Holzeicheln und Efeublätter – ist gewiss zu Recht mit der den Kelten von antiken Autoren attestierten Verehrung heiliger Haine in Verbindung gebracht worden.

Schwieriger und demgegenüber auch gewagter scheint die Interpretation der flächendeckenden Ornamente des „Berliner Goldkegels" oder „Berliner Goldhuts" aus der Zeit um 1000 v. Chr. als astronomisches Kalenderwerk. Das Wissen um den Mondzyklus und seine Bedeutung im Kalenderwesen wäre dieser These zufolge schon rund 500 Jahre vor den Berechnungen des griechischen Astronomen Meton von Athen in Mitteleuropa bekannt gewesen. Derartige Überlegungen scheinen mit der jüngst erfolgten Entdeckung der frühbronzezeitlichen „Himmelsscheibe von Nebra" unerwartet bestätigt (Bild oben).

Die rund zwei Millimeter dicke und zwei Kilo schwere Bronzescheibe, deren Echtheit nach vielfältigen Laboranalysen inzwischen als gesichert gilt, wird auf die Zeit um 1600 v. Chr. datiert. Sie weist – neben Sonne und Mond – insgesamt 32 kleine Goldblättchen auf. Sieben dieser wohl als Sterne anzusehenden Goldeinlagen, die mittels Tauschiertechnik befestigt sind, könnten den Sternhaufen der Plejaden darstellen. Doch anders als im Falle des Berliner Goldkegels, dessen Fundort nicht genau bekannt ist, lassen sich für die Himmelsscheibe von Nebra konkrete Anhaltspunkte dafür finden, dass dieser „Schlüsselfund der Archäoastronomie" den Menschen im zweiten vorchristlichen Jahrtausend zur Bestimmung des Zeitpunktes von Aussaat und Ernte diente.

Vielleicht liegt das Besondere archäologischer Schätze gerade darin, dass die archäologische Forschung in der Gegenwart an einem Punkt angelangt ist, von dem aus es in nicht allzu ferner Zeit möglich sein wird, über die Objekte hinaus bis zur einzelnen Person vorzudringen. Der Weg dahin scheint viel versprechend. ■

__Matthias Mochner__ arbeitet als freier Journalist, Reiseleiter und Museumsführer in Berlin.

Die erste nationale deutsche Archäologieausstellung „Menschen, Zeiten, Räume – Archäologie in Deutschland" ist vom 6.12.2002 bis zum 31.3.2003 im Martin-Gropius-Bau Berlin, Niederkirchnerstraße 7, 10963 Berlin, zu sehen; geöffnet mittwochs bis montags 10–20 Uhr. Vom 9.5.–24.8.2003 wird sie in der Kunst- und Ausstellungshalle der Bundesrepublik Deutschland in Bonn gezeigt. Der 400 Seiten starke Begleitband zur Ausstellung ist im Theiss Verlag, Stuttgart, erschienen und kostet als Buchhandelsausgabe 34,90 €.

NACHGEHAKT

Kein Rummel mehr im Menschenpark

Erinnern Sie sich? Zur Jahrtausendwende löste der Philosoph Peter Sloterdijk mit seinem Vortrag über „Regeln für den Menschenpark" eine rege Debatte über die biotechnische Zukunft der Menschheit aus (SdW 11/1999, S. 104). Monatelang erschienen in der Presse Artikel-Breitseiten von Biologen, Philosophen und Theologen. Besonders erhitzten sich die Gemüter an der Frage, ob menschliche Embryonen per Klonen gezüchtet werden sollten, um als Ersatzteillager für defekte Organe zu dienen.

Heute, zwei Jahre später, sind aber die eigentlichen Fragen noch immer: Dürfen menschliche Eizellen künstlich befruchtet werden, nur zu dem Zweck, der Medizin embryonale Stammzellen zu liefern? Ist die befruchtete Eizelle einem menschlichen Wesen gleichzusetzen – worauf insbesondere die katholische Kirche beharrt? Oder ist es legitim, mikroskopische Zellhaufen zu verbrauchen, um menschliches Leid zu lindern, wie das britische Unterhaus in seinem Beschluss zur Stammzellforschung vom Dezember 2000 befand?

Doch offenbar ist die Luft raus. In Deutschland bleibt Forschung an embryonalen Stammzellen generell auf bereits vorhandene Zelllinien eingeschränkt, und in den USA zumindest die staatlich finanzierte Forschung. Seither scheint das öffentliche Interesse an biotechnischen und bioethischen Problemen dramatisch nachgelassen zu haben; Themen wie internationaler Terrorismus und Kriegsgefahr im Nahen Osten fesseln die Aufmerksamkeit nun stärker als die theoretische Bedrohung der Menschenwürde durch geklonte Embryonen.

Rein sachlich ist die Abkehr öffentlicher Neugier weg von der Biotechnik eigentlich nicht zu begründen. Bleibt das nun ein Epochenthema oder nicht? Sind etwa auf einmal alle Fragen gelöst? Besteht kein Diskussionsbedarf mehr? Offenbar verhält sich die Öffentlichkeit wie ein unreifes Gehirn mit primitivem Wahrnehmungsapparat, dem die Massenmedien als Augen und Ohren dienen. Alle Quartale blockiert ein scheinbar weltuntergangsschweres Thema alle Kanäle, für andere Themen ist kaum mehr Platz. Nachhaltige Debatten über Biothemen stoßen auf Desinteresse; sie haben ihren Sexappeal verloren.

Tatsächlich ist im Bereich der Biotechnik alles komplizierter, als der aufgeregte

Wortwechsel zwischen Theo- und Biologen vermuten ließe. Einerseits begründen Fachleute wie Peter Propping, Direktor am Institut für Humangenetik der Universität Bonn, warum die Vision vom eugenisch manipulierten Wunschkind eine Fata Morgana bleiben wird („Frankfurter Allgemeine Zeitung" vom 24. September): An begehrten Eigenschaften wie „intelligent", „schön" und „gesund" sind nicht nur zahlreiche Gene beteiligt, deren Zusammenwirken, selbst wenn sie alle bekannt wären, sich kaum steuern ließe, sondern auch die Umwelt. Es steht eben nicht nur in den Genen, wer man wird. Die multifaktorielle Natur der Vererbung verbietet von vornherein eine absichtsvolle pränatale Selektion, wie sie Scharlatane versprechen oder Biotechnikgegner als Schreckgespenst an die Wand malen.

Als problematisch erweist sich aber auch ein Ausweg aus der gesellschaftlich umstrittenen Embryonenforschung, der zunächst viel versprechend schien: Statt embryonale Stammzellen zu verwenden, hofften Forscher auf adulte Stammzellen ausweichen zu können, die etwa aus dem Knochenmark von Erwachsenen gewonnen werden. Doch in letzter Zeit wird unter Experten heftig gestritten, ob das Potenzial solcher Zellen tatsächlich ausreicht, verschiedenste Gewebe und Organe zu bilden. Auch hier gilt: alles nicht so einfach.

Andererseits löst selbst ein sensationeller Durchbruch in der Fortpflanzungsmedizin offenbar keine große Debatte mehr aus: Angeblich gelang die Verschmelzung einer Keimzelle eines Menschen mit einer Körperzelle eines anderen Menschen zu einer Zelle mit komplettem Chromosomensatz („Spiegel" vom 9. September). Wenn dieses Kunststück Routine würde, müsste ein Embryo, dessen Erbmaterial natürlicherweise ein Mix aus Vater und Mutter ist, nicht mehr aus einer Eizelle der Mutter und einer Samenzelle des Vaters entstehen. Auch gleichgeschlechtliche Paare, die sich fortpflanzen möchten, wären nun in der Lage, ein gemeinsames Kind in die Welt zu setzen.

Doch die Aufmerksamkeit der Medien hat sich längst anderen Reizthemen zugewandt. Das ist vielleicht sogar gut so. Das Verschwinden eines Themas aus den Medien kann auch bedeuten, dass es eine gewisse Reife erreicht hat. Der Sloterdijk'sche „Menschenpark" hat sich jedenfalls geleert wie ein Rummelplatz, wenn die Scheinwerfer ausgehen.

Michael Springer

DONAU-UNIVERSITÄT KREMS

„Heiße Luft“ in der Wachau?

Die Donau-Universität im niederösterreichischen Weinort Krems ist die erste staatliche Hochschule in Europa, die sich ausschließlich auf postgraduale Weiterbildung spezialisiert. Doch ihr bläst der Wind ins Gesicht.

Von Renate I. Mreschar

Die Chancen der Donau-Universität bestehen darin, ihren Unitatscharakter auszubauen und zu bewahren“, sagt der ehemalige Kuratoriumsvorsitzende Leopold März, Rektor der Universität für Bodenkultur in Wien. Der Grund für diese Einzigartigkeit: Weiterbildung „in intelligent definierten fachlichen Nischen“, welche die 1994 gegründete Hochschule im Herzen der Wachau zu ihrem Kerngeschäft gemacht hat.

Kurse werden in den Bereichen Wirtschafts- und Managementwissenschaften, Telekommunikation, Information und Medien, Europäische Integration sowie Umwelt- und Medizinische Wissenschaften angeboten. Seit 1999 hat sich die Zahl der Studierenden verdreifacht. Gegenwärtig sind 2000 Studierende in den rund fünfzig verschiedenen Weiterbildungskursen eingeschrieben. Die meisten kommen aus Österreich, nur ein Viertel aus dem Ausland. In Krems lernen sie zum Beispiel in einer „funktional orientierten Basisausbildung“ mit „flexiblem Lehrgangsdesign“ „ihre eigenen Grenzen und ihren persönlichen Handlungsspielraum bewusst zu erweitern und eine starke Ziel- und Erfolgsorientierung zu entwickeln“. Nach der Uni-Philosophie setze sie das in die Lage, „Veränderungsprojekte erfolgreich zu bewältigen“.

Der Durchschnittsstudent an der Donau-Universität ist 35 Jahre alt, hat in der Regel bereits ein Hochschulstudium abgeschlossen, verfügt über die ersten Praxisjahre und ist – so erläutert die Unileitung stolz – „auf dem Weg, seine berufliche Position zu festigen oder auszubauen“. Dabei helfe ihm die Krems-Methode: berufsbegleitende Blockseminare, die je zu einem Viertel aus theoretischem und praktischem Input, Fallstudien und Anwendung des Erlernten am Arbeitsplatz oder im eigenen Unternehmen bestehen. Abgeschlossen wird mit einem universitätseigenen Zertifikat oder international üblichen akademischen Graden wie Master of Business Administration (MBA) oder Master of Advanced Studies (MAS). Die Gesamtkosten liegen zwischen 5000 und 25 000 Euro pro Kurs, je nach Zahl und Dauer der Module beziehungsweise Blockveranstaltungen innerhalb des jeweiligen zwei- bis viersemestrigen Aufbaustudiums. Werner Fröhlich, aus Flensburg kommender Präsident der Donau-Universität, hält die hohen Lehrgangskosten für die beste Evaluierung. Und PR-Chef Gerhard Gensch sagt: „Im internationalen Vergleich sind unsere Studiengebühren ausgesprochen moderat: Es war nie unser Ziel, uns mit Billiganbietern zu vergleichen oder im europäischen Bildungsmarkt in der Kategorie Sonderangebote geführt zu werden.“

Die Uni finanziert sich mit ihren Gebühren zur Hälfte selbst, wird nach privatwirtschaftlichen Kriterien wie ein Unternehmen geführt und ist dabei Europas erste und bislang einzige ausschließlich auf postgraduale Weiterbildung spezialisierte staatliche Uni. Der Bund übernimmt die Kosten für Personal und Sachmittel, das Land Niederösterreich die Kosten für die Infrastruktur.


DONAU-UNIVERSITÄT KREMS / ZAJC

Die Donau-Universität im niederösterreichischen Krems hat ihren Sitz in einer ehemaligen Tabakfabrik.

Selbstreflexion der Teilnehmer

Es gäbe durchaus auch Studienangebote, die sich nicht „rechnen“, so Fröhlich, wie die in der neu strukturierten Abteilung für Kulturwissenschaften. Dort wird interkulturelle Kompetenz vermittelt. Die Studierenden erhalten ein „spezielles Training zur Verbesserung ihrer Beobachtungsgabe“ und werden mit „Handwerkszeug für funktionierende Geschäftsbeziehungen“ vertraut gemacht. Ziel eines anderen Seminartrainings ist es, die Teilnehmenden „zu ihrem persönlichen Lebensziel zu begleiten: zu dem Zustand, der sie glücklich macht, der es ihnen erlaubt, später einmal zurückzublicken und zufrieden zu sein mit dem Erlebten und Erreichten.“ „Wir sind keine Wissensvermittlungsanstalt, sondern wollen zur Selbstreflexion der Teilnehmer beitragen“, erläutert Fröhlich das Anliegen seiner Hochschule.

Sie ist denn auch – bei solchen Zielen – nicht unumstritten. Kritiker werfen ihr Verschwendung von Steuergeldern und intransparente Finanzgebarung vor. Ganz offensichtlich regen sich hier Neid und Missgunst der etablierten österreichischen Universitäten. Kritik kommt aber auch von innen. So haben junge wissenschaftliche Mitarbeiter Krems bereits nach kurzer Zeit wieder verlassen. Und es gibt Pädagogen, Medienfachleute und Filmmanager, die nach Postgraduate-Kursen in Kommunikation an der Donau-Universität nicht nur enttäuscht, sondern entsetzt sind, wie niveaulos das Ganze war und wie wenig geboten wurde. „Heiße Luft auf dem Teller“ hat der österreichische Kabarettist Helmut Qualtinger solches dereinst genannt. Dem hält Gensch entgegen, dass viele Absolventen heute „in Top-Positionen in der

Wirtschaft oder in öffentlichen Einrichtungen“ tätig sind.

Eine vom österreichischen Bildungsministerium beauftragte Expertengruppe unter Vorsitz des früheren Präsidenten der deutschen Hochschulrektorenkonferenz Uwe Erichsen bescheinigt der Donau-Universität Krems „Entwicklungspotenzial“. Gefordert wird aber vor allem, „die Verstetigung einer universitären Ansprüchen genügenden kritischen Masse durch Vermehrung des im festen Vollzeitdienstverhältnis zur Donau-Uni stehenden wissenschaftlichen Personals herbeizuführen“. Jeder der überwiegend in Nebentätigkeit wirkenden Lehrbeauftragten unterrichtet dort nicht selten gerade mal zwei Stunden pro Jahr. Für dieses mehr oder weniger unverbundene Nebeneinander von Vorträgen fehle „ein bestimmten Standards verpflichtendes Einschätzungs- und Beurteilungspotenzial“. Und weiter: „Die mit dem Begriff Universität auch heute noch verbundenen Ansprüche sind in Krems bisher allenfalls punktuell eingelöst.“ ■

Renate I. Mreschar, *promovierte Historikerin, ist Wissenschaftsjournalistin in Bonn.*

AM RANDE

Künstliche Intelligenz im E-Commerce?

Mein Buchhändler erinnert sich an jedes einzelne der vierzig Bücher, die ich in den letzten drei Jahren bei ihm gekauft habe. Er kennt alle drei Millionen Titel, die derzeit in den USA im Druck sind, dazu noch etliche vergriffene alte Schätze. Aus diesem Reichtum macht er mir bei jedem Besuch neue Vorschläge, was mich noch interessieren könnte, und oft finden diese tatsächlich mein Interesse. Ist ja kein Wunder, werden Sie jetzt sagen, der Buchhändler ist ein Computerprogramm.

Ist er das wirklich? Je perfekter das Programm wird, desto weniger kann man sich dessen sicher sein, dass es nur ein Programm ist. Der ganze E-Commerce ist ja ein gigantischer Turing-Test. Bei jeder Marketing-E-Mail, die man bekommt, bleibt ungewiss, welcher Anteil von einem menschlichen Wesen in die Tastatur gehackt wurde, und welcher unverfälscht aus den Gedanken eines Elektronenhirns entspringt. Doch die Web-Seiten der Internet-Händler bestehen den Test bisher noch nicht. Bei aller Bewunderung für die Effizienz meines elektronischen Buchhändlers kann ich – zumindest jetzt noch – in gewissen Situationen erkennen, dass ihm menschliche Intelligenz fehlt. Er hat nämlich bis heute nicht kapiert, dass ich in einer Art Dreifaltigkeit auftrete, da ich als Käufer, als Autor und als Verkaufspartner mit ihm kommuniziere.

Als Autor sehe ich natürlich – mit der Eitelkeit aller Autoren dieser Welt – ungefähr dreimal täglich nach, ob sich vielleicht eines meiner Bücher vom Verkaufsrang 36517 auf 21395 hochgeschwungen hat. Freudestrahlend verkündet mir das Programm jedes Mal wieder, dass ich genau dieses Buch am 17. November 1999 gekauft habe, und ob ich es nicht vielleicht rezensieren möchte. Für ein anderes meiner Bücher hatte ich bereits einen „Kommentar des Autors“ beigesteuert, der auch in meinen Kundendaten aufgeführt ist, also hätte mein sonst so perfekter Buchhändler um zwei Ecken herum die Verbindung herstellen können, wenn ihm schon die Namensgleichheit und regelmäßige Wiederkehr zu derselben Seite nicht auffällt.

Als Autor mit einem recht häufigen Namen werde ich gleich zum Opfer einer zweiten Schwäche des Systems: Namensvettern werden nicht unterschieden. Wenn ich von meinem Buch ausgehend nach anderen Büchern desselben Autors frage, bekomme ich über fünfzig Angebote, darunter „Model - The ugly business …“, eine Grammatik der französischen Sprache und einiges mehr. Mindestens fünf Namensvettern haben sich in die Liste eingeschlichen und sind für mehr als neunzig Prozent der aufgeführten Bücher verantwortlich. (Wir könnten schon bald einen Chat-Room aufmachen, obwohl die Identifizierung der Teilnehmer schwierig wäre.)



Mit meiner Identität als Kunde hat das Programm auch so seine Schwierigkeiten. Na klar, das assoziative Gedächtnis funktioniert gut (Kunden, die A gekauft haben, mögen auch B). Dass ich ein Fan der kolumbianischen Liedermacherin Shakira bin, hat mein Buchhändler (der auch mein CD-Händler ist) schon lange kapiert, sie taucht wie durch ein Wunder auf jeder Seite auf, die ich ansehe. Aber an der Frage, wie das mit den obskuren amerikanischen Science-Fiction-Romanen in Einklang zu bringen ist, knabbert er noch. Schließlich kann er ja nicht wissen, dass ich die für meine Frau bestelle, es geht ja alles an dieselbe Lieferadresse.

Wenn mein Händler mich als Verkaufspartner anspricht, scheint er schon wieder alles vergessen zu haben, was er über mich als Kunden weiß. Die Link-Empfehlungen für Partner sind in der Regel solche Produkte, die sowieso schon Bestseller sind und die mich nicht die Bohne interessieren. Anscheinend funktionieren Cookies nur für Kunden, nicht für Autoren oder Partner.

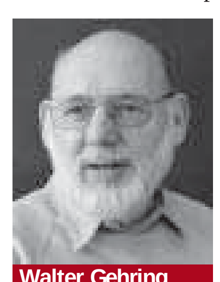
Derzeit verrät sich das Programm noch ebenso sehr durch seine Stärken wie durch seine Schwächen. Demnach dürfte der Tag, an dem Computer die Macht übernehmen, noch eine Weile hin sein. Wenn mich mein Buchhändler mit den Worten begrüßt: „Sie wissen doch, ich kann mir so schlecht Namen merken“, dann werde ich anfangen, mir Sorgen zu machen.

Michael Groß
www.michaelgross.co.uk

ENTWICKLUNGSBIOLOGIE

Von Antennenbeinen und Augengenen

Auf seinen Nasen schreitet einher das Nasobem, von seinem Kind begleitet. Es steht noch nicht im Brehm.“ An diesen Reim von Christian Morgenstern erinnerte sich der Schweizer Biologe Walter Gehring, als er eine Drosophila-Mutante entdeckte, die an Stelle von Antennen Beine an ihrem Kopf trug. Nasobemia nannte er diese fehlgebildete Taufliege. Ihr hat der Forscher eine Entdeckung zu verdanken, für die er nun den Balzan-Preis erhielt. Denn auf der Suche nach der Ursache für die Fehlbildung identifizierte Gehring 1984 ein DNA-Motiv, das als zentraler Schalter für die korrekte Entwicklung von Drosophila dient: die Homöobox (siehe Spektrum der Wissenschaft 12/1985, S. 148).


Walter Gehring

Zu den Genen, die das 180 Nukleotide lange DNA-Fragment enthalten, gehören vor allem die homöotischen Gene, die für die geordnete Differenzierung der einzelnen Körpersegmente zuständig sind. Des Weiteren ist es Bestandteil der Gene, die beispielsweise die Segmentierung der Taufliege steuern. Das Genprodukt der Homöobox, die Homöodomäne, koordiniert die Entwicklung, indem es an die DNA bindet und dadurch die Bildung bestimmter Proteine aktiviert. Mittlerweile weiß man, dass es solche regulatorischen DNA-Fragmente nicht nur in Drosophila gibt, sondern auch in höheren Lebewesen. Säugetiere bis hin zum Menschen haben zum Beispiel Hox-Gene, die daran mitwirken, Segmenten von Hirn, Skelett und anderen Geweben eine Identität zu verleihen.

Eine weitere bahnbrechende Entdeckung machte Gehring 1995, als er das Gen *pax6* isolierte, das bei Drosophila – und möglicherweise in der gesamten Tierwelt – für die Entwicklung des Auges zuständig ist. Auch *pax6* ist ein regulatorisches Gen, allerdings mit besonderem hierarchischem Stellenwert: Es kontrolliert das Funktionieren von etwa 2000 weiteren Genen – gerade so, als ob durch Betätigen eines zentralen Schalters alle Lichter in einem Haus angingen.



WALTER GEHRING

Auf der Antenne einer Taufliege bildet sich ein zusätzliches Auges (links der gesamte Fliegenkopf, rechts Detailaufnahme).

Gehring promovierte an der Universität Zürich. Nach einem Forschungsaufenthalt in den USA wurde er 1972 am Biozentrum der Universität Basel Professor für Entwicklungsbiologie und Genetik. Den Balzan-Preis erhält er „für seinen grundlegenden Beitrag zur Entdeckung des universellen Prinzips, das dem Körperbau und der Entwicklung des Auges bei Metazoen zugrunde liegt“. Der Preis ist mit einer Million Schweizer Franken dotiert und fließt zur Hälfte in die Förderung von Forschungsprojekten junger Wissenschaftler. Die Internationale Balzan-Stiftung fördert weltweit Leistungen in den Bereichen Kultur, Geistes- und Naturwissenschaft, sowie humanitäre Verdienste für Frieden und Brüderlichkeit unter den Völkern.

LASERFORSCHUNG

Quantenkaskaden bei Raumtemperatur

Der Laserstrahl nach Maß dringt durch Wasserdampf, Regen und Schnee: Infrarotes Laserlicht mit einer Wellenlänge von etwa neun Mikrometern könnte Telefonate künftig überirdisch in unsere Haushalte übertragen. Die notwendige Basistechnologie steht seit kurzem zur Verfügung: Der schon 1994 entwickelte Quantenkaskaden-Laser (QCL) wurde im Jahr 2001 so verbessert, dass er bis zu einer Umgebungstemperatur von 39 Grad Celsius betriebsfähig bleibt. Seine Vorgänger müssen noch mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden.


Jérôme Faist

Für die wissenschaftlichen Beiträge zur Entwicklung sowohl des ersten QCL als auch seiner fortgeschrittenen Variante erhielt Jérôme Faist, Professor an der Universität Neuchâtel, nun den Nationalen Latsis-Preis 2002. Dieser ist mit 100 000 Schweizer Franken dotiert und wird jährlich vom „Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung“ im Auftrag der Genfer Latsis-Stiftung verliehen.

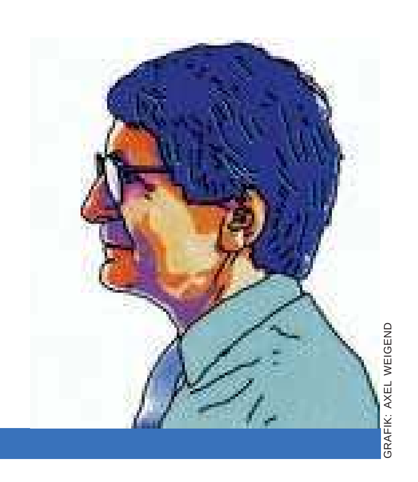
Die physikalischen Vorgänge in einem QCL gleichen einem „elektronischen Wasserfall“: Elektronen, die in dünnen Halbleiterschichten eingesperrt sind, nehmen Energie durch eine angelegte Spannung auf. Diese Energie geben sie in Form von Lichtquanten stufenweise, in „Kaskaden“, wieder ab. Die Höhe der Energiestufen hängt von der Dicke der Halbleiterschichten ab und bestimmt die Wellenlänge des Laserlichts. Durch Veränderung der Schichtdicke kann die Wellenlänge – im mittleren Infrarot-Bereich zwischen drei und zwanzig Mikrometern – fein abgestimmt und so für verschiedenste Anwendungen optimiert werden. Bei bisherigen Lasertypen hängt die Wellenlänge von der chemischen Zusammensetzung ab.

Dank der neueren Forschungen der Arbeitsgruppe um Jérôme Faist lässt sich die Quantenkaskade mittlerweile auch bei Raumtemperatur lostreten. Dieser Fortschritt ist unter anderem der Molekularstrahl-Epitaxie zu verdanken, einem Verfahren, das sehr feine Halbleiterstrukturen erzeugt – im Extremfall nur eine Atomschicht dick.

Für Quantenkaskaden-Laser gibt es zahlreiche Einsatzmöglichkeiten: Neben ihrer möglichen Anwendung in der Telekommunikation verbessern sie vor allem die Analyse von molekularen Gasen und Flüssigkeiten. Diese zeigen im mittleren Infrarot häufig charakteristische Absorptionslinien, die sich mit Hilfe eines QCL präzise bestimmen lassen. Die Messempfindlichkeit ist dabei um mehrere Größenordnungen höher als die, die sich mit Laserquellen für nahes Infrarot erreichen lassen. Entfällt nun zusätzlich die Notwendigkeit der Kühlung, empfehlen sich die neuartigen Laser für viele Bereiche der Industrieproduktion, der Medizin und der Umwelttechnik.

Freihändig fahren

Ein Fahrrad wird – bei nicht zu langsamer Fahrt – von Kreiselkräften aufrecht gehalten. Die Kunst des Radfahrens besteht nur darin, das Spiel dieser Kräfte nicht zu stören.



GRAFIK: AXEL WEIGEND

VON WOLFGANG BÜRGER

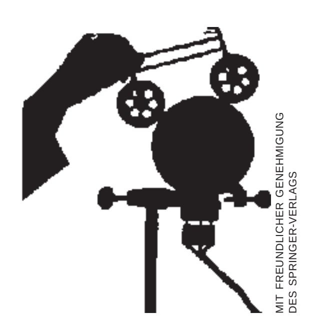
Drahtseilakt: Der unentbehrliche Herr Sperber, in einer Person Werkstattleiter und Faktotum und stets im weißen Labormantel zur 8-Uhr-Vorlesung zur Stelle, reichte dem Professor ein Spielzeug-Fahrrad. Das kleine Modell hatte als Räder unbereifte Schnurlaufrollen, die aus einem Metallbaukasten stammen konnten, und im Unterschied zu „normalen" Fahrrädern am Vorderrad eine senkrechte Lenkachse. Professor Pohl brachte die beiden Räder durch Andrücken an eine rasch rotierende Trommel auf Touren (Bild rechts oben) und setzte sein akademisches Fahrzeug auf ein langes Drahtseil, das quer durch den großen Physik-Hörsaal der Göttinger Universität gespannt war. Ohne Hilfe eines Fahrers fuhr das Zweirad mit (maßstäblich gesehen) hoher Geschwindigkeit aufrecht auf dem Seil, bis es vor dessen Ende von einem Helfer aufgefangen wurde.

Zur Erklärung brachte der Professor die Räder seines Spielzeugs noch einmal auf hohe Drehzahl und kippte dann das Fahrrädchen vor den Augen der mehr als vierhundert Zuhörer im Saal um seine horizontale Längsachse nach rechts. Sofort ging das Vorderrad in die Rechtskurven-Stellung, als wollte es dem Umfallen nach rechts zuvorkommen. Wegen der senkrechten Lenkachse ließ sich die Reaktion des Vorderrads auf das Kippen nicht wie bei einem gewöhnlichen Fahrrad auf ein Übergewicht der Vorderradgabel mit dem Vorderrad zurückführen. Im statischen Gleichgewicht konnte die Drehung nur durch Kreisel-Präzession des Vorderrads verursacht worden sein. Hierzu der Kommentar des Professors: „Auf den Boden gesetzt läuft das kleine Modell einwandfrei auf gerader Bahn davon. Der Fahrer ist ganz entbehrlich. Seine Leistung beim Freihändigfahren ist recht bescheiden: Er hat nur zu lernen, die automatisch einsetzenden Präzessionsbewegungen des Vorderrads nicht zu stören." Nach dem Klopfkonzert der Studenten konnte Pohl sicher sein, seine Zuhörer von den „Kreiselkräften" überzeugt zu haben.

Hatte der Professor das Fahrrädchen nur deshalb so schnell fahren lassen, weil diese Kräfte am Vorderrad bei langsamer Fahrt zu schwach wären, es aufrecht zu halten? Nachgefragt: Wie halten Kreiselkräfte ein Fahrrad aufrecht, das seinen Schwerpunkt weit oberhalb der „momentanen Drehachse" hat, die durch die Fußpunkte seiner beiden Räder führt? Wer die Kreiselpräzession des Vorderrads unterdrückt, indem er die Lenkung in der Geradeaus-Stellung blockiert, wird sein Fahrrad nach links oder rechts umfallen sehen, einerlei wie rasch sich die Räder drehen.

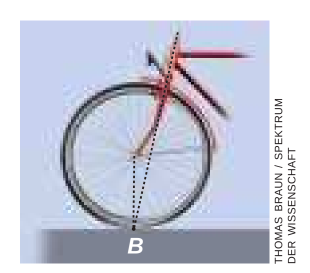
Der Mensch im Regelkreis: Schaut man kleinen Kindern zu, die Rad fahren lernen, scheint freihändiges Fahren doch nicht so einfach zu sein. Bei sehr geringen Geschwindigkeiten, bei denen das „Kreiselmoment" des Vorderrads im Vergleich zu dem von der Fahrgeschwindigkeit unabhängigen Drehmoment der Schwerkraft im Wortsinn „nicht ins Gewicht fällt", bedarf es einiger Erfahrung, um ohne Griff an den Lenker das Fahrrad zu beherrschen. Dann muss der Fahrer selbst zum Regler werden und sein Gerät mit dem Körper ausbalancieren. Dabei kann es nicht mehr schnurstracks geradeaus fahren, denn der Mensch hat eine ziemlich „lange Leitung" und antwortet als Regler erst dann mit einem Korrektur-Impuls, wenn er eine Abweichung des „Ist" vom „Soll" wahrnimmt.

Geometrie der Lenkung: Bei gebräuchlichen Fahrrädern steht die Lenkachse nicht senkrecht wie bei Pohls Modell, sondern ist um etwa 15 Winkelgrade zum Fahrer hin geneigt. Die Vorderrad-Gabel ist am unteren Ende so weit nach vorn gebogen („gekröpft"), dass der Durchstoßpunkt der Lenkachse durch die Bodenebene so genau wie möglich in den Fußpunkt des Vorderrads fällt (der so genannte „Nachlauf" 0 ist; Bild rechts unten). Wird Radfahren dadurch sicherer? Nicht unbedingt. Aber bequemer! Die Kröpfung der Vorderrad-Gabel und ihre Verjüngung nach vorn geben ihr Elastizität und helfen, Stöße vom Boden abzufedern. Der fehlende Nachlauf erleichtert das Lenken, indem er den Widerstand am Boden verringert. Die Neigung der Lenkachse zum Radfahrer macht die Bedienung des Lenkers bequemer – tieferen Sinn kann ich in all diesen konstruktiven Verbesserungen nicht finden. In der Encyclopaedia Britannica liest man unter dem Stichwort „bicycle", durch die Lenk-Geometrie gelange der Schwerpunkt des Fahrrads (einschließlich Fahrer und Gepäck) bei Geradeaus-Stellung der Lenkung in seine tiefste Lage. Wenn das so wäre, würde die Lenkung nach einem Ausschlag von selbst wieder in die ▶



MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG DES SPRINGER-VERLAGS

Professor Pohls Modellfahrrad wird mit Hilfe einer schnell rotierenden Scheibe auf Touren gebracht.



THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Die Lenkachse geht genau durch den Fußpunkt *B* des Vorderrads.

Physik des Freihändigfahrens

Nicht am Lenker wackeln – schnell fahren!

Wir führen ein rechtwinkliges Koordinatensystem ein, das mit dem Ring mitläuft, allerdings dessen Rollbewegung nicht mitmacht. Die x- und die y-Achse liegen in der Ringebene. Die x-Achse weist stets nach oben, die y-Achse horizontal in Laufrichtung nach vorn, die z-Achse steht senkrecht auf der Ringebene (man darf sie sich mit dem Ring fest verbunden vorstellen).

Der Ring ist um den Winkel θ gegen die Vertikale gekippt; θ ist also der Winkel zwischen x-Achse und Vertikale ebenso wie zwischen z-Achse und der horizontalen Ebene. Da θ klein ist, dürfen wir die Näherungen $\sin\theta \approx \theta$ und $\cos\theta \approx 1$ vornehmen. Außerdem weicht die Laufrichtung des Rings (die Tangente seiner Spur am Boden) um den Winkel ψ von einer festen Bezugsrichtung ab. Schließlich sei ϕ der Winkel seiner Drehung um seine körperfeste z-Achse. Für seine Winkelgeschwindigkeit ω gilt also $\omega = d\phi/dt$.

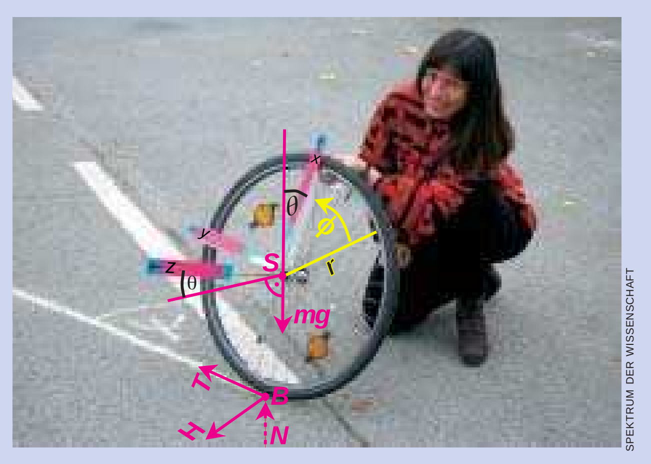
J und I bedeuten die Trägheitsmomente des Rings bezüglich seiner Drehung um die z-Achse bzw. um eine beliebige dazu senkrechte Drehachse wie x oder y. Da die Masse m des Rings in einer Ebene liegt und radialsymmetrisch um seinen Mittelpunkt verteilt ist, hat sein Trägheitsmoment um die z-Achse den Wert $J = mr^2$ (r ist der Ringradius). Die Trägheitsmomente um beliebige Querachsen sind genau halb so groß: $I = J/2$.

Schwerpunktsgleichungen: Die Bewegung des Rings ist ein reines Rollen: Er hüpft nicht, rutscht nicht weg und sinkt auch nicht in den Boden ein. Am Fußpunkt B wirken also Stützkräfte, die das verhindern: N gegen das Einsinken in den Boden, T gegen das Wegrutschen nach vorn und H gegen das Wegrutschen zur Seite. Da der Ring auch nicht abhebt, herrscht Gleichgewicht der Kräfte in x-Richtung ($N - mg - H\theta = 0$); die Kraftkomponenten liest man (unter Anwendung der genannten Näherungen für θ) aus der Grafik ab. Außerdem wird der Schwerpunkt S des Rings durch die Stützkräfte am Fußpunkt und sein Gewicht mg beschleunigt. In y-Richtung gilt $mrd\omega/dt = T$. In z-Richtung erfährt der Schwerpunkt des Rings die Bahnbeschleunigung $-rd^2\theta/dt^2$ (beim Kippen um die y-Achse) sowie die Zentripetalbeschleunigung $r\omega d\psi/dt$ (beim Kreiseln um die x-Achse). Die Summe dieser Beschleunigungen, mit der Masse m malgenommen, ist gleich der resultierenden Kraft in z-Richtung auf den Schwerpunkt:

$$(1)\qquad m\left(-r\frac{d^2\theta}{dt^2} + r\omega\frac{d\psi}{dt}\right) = (N - mg)\theta + H$$

(g ist die Schwerebeschleunigung).

Kreiselgleichungen: Beim Rollen in y-Richtung ändert sich der Drehimpuls $J\omega$ des Ringes um die z-Achse durch die Wirkung des Drehmoments der Kraft T ($Jd\omega/dt = -rT$). Aus der Schwerpunktsgleichung in y-Richtung und der Kreiselgleichung für z lässt sich die Kraft T eliminieren mit dem Ergebnis $d\omega/dt = 0$. Der Ring rollt also mit konstanter Bahngeschwindigkeit $v = r\omega$ und ist daher in y-Richtung kräftefrei: $T = 0$. Die Änderung des Drehimpulses in x-Richtung hat einen lokalen Anteil $Id^2\psi/dt^2$ und einen konvektiven Anteil $J\omega d\theta/dt$, der davon herrührt, dass beim Kippen des Rings um y ein Anteil des Spin-Drehimpulses J in die x-Richtung gedreht wird. Da auf den Ring kein Moment in x-Richtung wirkt, lässt sich dann aus



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

der Kreiselgleichung $Id^2\psi/dt^2 + J\omega d\theta/dt = 0$ für die x-Richtung schließen, dass der Drehimpuls D_x um diese Achse eine Konstante der Bewegung ist:

$$(2)\qquad D_x = I\frac{d\psi}{dt} + J\omega\theta$$

Das Drehmoment um y verursacht entsprechend sowohl eine lokale ($Id^2\theta/dt^2$) als auch eine konvektive Änderung ($-J\omega d\psi/dt$) des Drehimpulses, deren Summe gleich dem wirkenden Drehmoment ist. Die Kreiselgleichung für die y-Richtung lautet daher:

$$(3)\qquad I\frac{d^2\theta}{dt^2} - J\omega\frac{d\psi}{dt} = r(N\theta + H)$$

Aus den drei nummerierten Gleichungen ergibt die Elimination von N, H und $d\psi/dt$ eine Gleichung für den Kippwinkel θ. Setzt man dort für die Trägheitsmomente des Rings $J = mr^2 = 2I$ ein und lässt den Ring ohne vertikalen Drehimpuls starten ($D_x = 0$), folgt für den Kippwinkel die Differenzialgleichung

$$(4)\qquad \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{8}{3r^2}(v^2 - \frac{gr}{4})\theta = 0\,.$$

Für Geschwindigkeiten v, für die der Vorfaktor des zweiten Glieds der Gleichung positiv ist ($v^2 > gr/4$), hat sie eine sinusförmige Schwingung als Lösung. Dann kreiselt der Ring, ohne umzufallen.

Für den Spielreif eines Kindes ($r = 0{,}4$ m, $g = 10$ m/s^2) muss die Geschwindigkeit v dazu größer sein als 1 m/s = 3,6 km/h (Fußgänger-Tempo), unabhängig vom Gewicht des Rings. Der Ausflug des Rings ist allerdings nur dann von unbegrenzter Dauer, wenn der (hier nicht berücksichtigte) Energieverlust beim Rollen ständig durch einen Antrieb ersetzt wird.

Und das Fahrrad? Um die kritische Geschwindigkeit v für ein Fahrrad abzuschätzen, auf dessen Vorderrad außer der Radmasse m der Rahmen mit der Nutzlast wie eine zusätzliche Masse M drückt, wird die Zusatzmasse nur im Gewicht berücksichtigt. Das Fahrrad stabilisiert sich und seine Last, wenn $v^2 > (1 + M/m)gr/4$ ist. Das ergibt für geschätzte $m = 3$ kg und $M = 45$ kg Belastung Geschwindigkeiten von $v > 4{,}0$ m/s = 14,4 km/h (etwas rascheres Radlertempo), die man fahren muss, damit Kreiselkräfte das Fahrzeug selbsttätig aufrecht halten können.

Geradeaus-Stellung zurückkehren. Nach David E. H. Jones ist die Behauptung aber falsch. Er hat es nachgerechnet, nachdem es ihm an seinen Versuchsfahrrädern nicht gelungen war, die Schwerpunktslage nachzumessen.

„Reifen-Treiben“: Reduziert man das rollende Fahrrad auf sein Minimum, kommt man zu einem Spiel, das die Kinder früher auf unseren Straßen spielten und das heute noch in einigen afrikanischen Ländern zu Hause ist: Ein großer, leichter Holzring („Reifen“) wird mit einem Stöckchen aufrecht zum Rollen gebracht und immer wieder kurzzeitig angetrieben, sobald er, vom Rollwiderstand ermüdet, umzufallen droht. Dabei rollt er nicht genau geradeaus, sondern auf einer schlanken Wellenlinie, denn als Kreisel muss er „präzedieren“, um nicht umzufallen, falls er nicht überhaupt auf seinem einen ganzen Zentimeter breiten Außenrand ruht.

David Jones hat dazu bemerkt, ein Fahrrad sei in diesem Bild „ein rollender Ring mit einem Anhänger“. Bei aller Ironie – das ist eine sehr vernünftige Idee! Wenn das Vorderrad um die Lenkachse drehbar ist, wird seine Radachse vom Rest des Fahrrads einschließlich Fahrer und Gepäck vor allem durch ein zusätzliches Gewicht belastet, das von der Gewichtsverteilung und den Abmessungen abhängt. Bei geringer Fahrgeschwindigkeit fällt das Fahrrad um, wenn der Fahrer sich nicht Mühe gibt, es auszubalancieren. Oberhalb einer „kritischen“ Fahrgeschwindigkeit bleibt das Fahrrad aber von selbst aufrecht (siehe Kasten). Die „kritische“ Mindestgeschwindigkeit wächst selbstverständlich mit dem zusätzlichen Gewicht, das auf der Radachse lastet. ■

Literaturhinweise

Einführung in die Physik, Erster Band: Mechanik, Akustik und Wärmelehre. Von Robert Wichard Pohl. 17. Auflage, Springer, Berlin 1969.

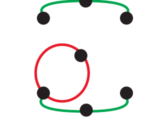
The Stability of the Bicycle. Von David E.H. Jones in: Physics Today, April 1970, S. 34.

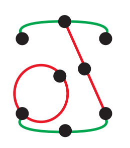
Fahrradphysik und Biomechanik. Von Michael Gressmann. Delius Klasing, Bielefeld 2002.

PREISRÄTSEL

Sprouts

von Pierre Tougne





Der Mathematiker J.H. Conway hat 1967 das Spiel Sprouts entwickelt (eine Einführung findet sich unter www.geocities.com/chessdp). So einfach die Regeln sind, so schwer ist es, eine Gewinnstrategie zu finden.

Man zeichnet zuerst eine beliebige Anzahl von Punkten („Knoten“) auf ein Papier. Zwei Spieler ziehen abwechselnd. Ein Zug besteht darin, einen weiteren Knoten aufs Papier zu setzen und ihn durch Linien mit zwei bereits vorhandenen Knoten, oder auch zweimal mit demselben Knoten, zu verbinden. Von einem Knoten dürfen nicht mehr als drei Linien abgehen, und Linien dürfen sich nicht schneiden. Wer den letzten möglichen Zug macht, ist Gewinner oder – in einer Variante des Spiels – Verlierer.

Oben ist der Beginn einer Partie aufgezeichnet. Der Anfangsspieler hat grün, der Gegner rot.

Schon bei einer bescheidenen Anzahl von drei bis vier Anfangsknoten entwickelt das Spiel eine schwer zu überschauende Eigendynamik.

Hier ist nun nicht die Gewinnstrategie für das Spiel Sprouts gefragt, sondern etwas Einfacheres: Wie viele neue Knoten können bei n Anfangsknoten höchstens entstehen, und wie viele mindestens?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D–69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf Schlüsselringe „Spin Code“ mit Pincode-Gedächtnisstütze. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 17. Dezember 2002, eingehen.

Lösung zu „Zehn mal sechs“ (Oktober 2002)

Es gibt sehr viele Möglichkeiten, die Zahl 6 mit drei gleichen Ziffern und irgendwelchen Rechenzeichen dazwischen darzustellen.

Ohne Zweifel sind das Wurzelzeichen und das Ausrufezeichen für die Fakultät Rechenzeichen. Ob das auch für Funktionsnamen gilt, wie ld und ln für den Logarithmus zur Basis 2 bzw. e („logarithmus dualis“ bzw. „naturalis“)? Im Zweifel ja. Am elegantesten – und sehr häufig genannt worden – sind Lösungen mit möglichst wenig Zeichen wie die von Harald Krüger:

$(0!+0!+0!)!=6$	$5+5:5=6$
$(1+1+1)!=6$	$6+6-6=6$
$2+2+2=6$	$7-7:7=6$
$3\times3-3=6$	$8-\sqrt{\sqrt{8+8}}=6$
$4+4-\sqrt{4}=6$	$9-9\sqrt{9}=6$

Nur in Einzelfällen wie $\sqrt[6]{6^6}=6$ und $2^2+2=6$ konnte die Anzahl der verwendeten Rechenzeichen noch unterboten werden.

Mit der eckigen Klammer („Gauß-Klammer“), die „runden nach unten auf die nächste ganze Zahl“ bedeutet, fand Marianne Bader aus Immenstaad die Darstellungen [ld 111]=6 und [ln 888]=6.

Wolfgang Moldenhauer aus Erfurt erweiterte die Aufgabenstellung auf die Zahlen 10 bis 12 (lg ist der übliche Logarithmus zur Basis 10):

$$(\lg 10+\lg 10+\lg 10)!=6$$
$$(1\times1+1\times1+1\times1)!=6$$
$$1\times2+1\times2+1\times2=6$$

Die Gewinner der fünf Regenschirme „Osiris“ sind Marianne Bader, Immenstaad; Harald Krüger, Reichenbach; Wolfgang Meier, Bochum; Peter Pendzig, Konstanz; und Ulrich Krebs, Heusweiler.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet „Mathematik“ jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

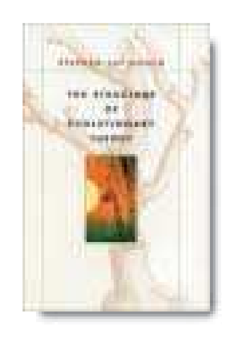
BIOLOGIE



Stephen Jay Gould

The Structure of Evolutionary Theory

Harvard University Press, Cambridge (Massachusetts) 2002.
1433 Seiten, $ 39,95



Mit seinem letzten, schwergewichtigen Werk hat uns der kürzlich verstorbene Harvard-Professor und streitbare Autor Stephen Jay Gould ein sehr eigenwilliges Vermächtnis hinterlassen. Denn er präsentiert hier nicht etwa „die" Evolutionstheorie, sondern seine eigene, postdarwinistisch erweiterte Fassung derselben. Erweitert, indem er erstens die Weitergabe von Information als eigentliche Basis der Evolution leugnet und zweitens Konkurrenz um Ressourcen als wesentliches Element der natürlichen Selektion beiseite lässt. Das geschieht beiläufig irgendwo im Text und ist eingebettet in unterhaltsames bis detailbesessenes Rekapitulieren fremder wie eigener Denkwege. Ich greife diese beiden mir wichtigen Punkte heraus.

Gould musste wissen, dass biologische Information in Genen kodiert ist und in Kopien der Gene weitergegeben wird. Entscheidend ist die Information, nicht das Material. Dennoch besteht Gould auf „material continuity throughout": Selbst wenn es gelänge, ein Lebewesen aus seinen Nukleotid-Sequenzen als Rohbausteinen zu synthetisieren und sich dieses in nichts von seinem natürlich erzeugten Vorbild unterschiede, dürfe man es nicht als Mitglied derselben Art ansehen. Er sagt weder, wie das bei Unkenntnis des Herstellungsweges zu vermeiden wäre, noch, welche andere Basis als die Information er denn für seine Evolutionstheorie in Anspruch nimmt.

Gould weiß, dass die genetische Information Programme für Bau und Reaktionsweisen der Organismen liefert, dass das Individuum als Inkarnation der genetischen Information mit der Umwelt interagiert und dass die positiven und negativen Folgen dieser Interaktion darüber entscheiden, ob und wie oft seine Gene vervielfältigt werden. Das anerkennt er ausdrücklich als Selektion. Aber Gould ist Paläontologe, sieht Fossilreihen in datierten Schichten und findet Arten, die Millionen von Jahren unverändert bleiben, bis in einem Faunenbruch plötzlich die meisten verschwinden und nur wenige verbleibende zu einem Evolutionsschub beitragen. Die sprunghaften Änderungen will Gould mit Selektion auf höherer Ebene, von Populationen, Arten oder noch höheren taxonomischen Einheiten, erklären. Dabei bewertet er eine Einheit als umso erfolgreicher, je mehr Untereinheiten aus ihr hervorgehen. Der beste Beleg für Art-Selektion sei die Tatsache, dass verschiedene Arten sich mit unterschiedlichen Raten aufspalten. Heute gibt es vom Schimpansen zwei Arten, vom Menschen aber nur eine. Demnach wäre der Schimpanse evolutionär erfolgreicher als der Mensch?

Darüber, wie Selektion auf Art-Ebene wirken kann, ohne an Merkmalen der Individuen anzusetzen, hat Gould während seiner ganzen Karriere am meisten nachgedacht; zuletzt anhand von Eigenschaften, die als „Emergenz" erst auf überindividueller Ebene auftreten, wie die Merkmalsvarianz. In seinem konstruierten Beispiel lässt er in einem verfaulenden Tümpel eine Fischart aussterben, deren Vertreter allesamt sauerstoffreiches Wasser brauchen, während von einem anderen Fisch mit größerer Kiemenfunktion-Varianz einige Individuen (!) überleben, die auch in schlechtem Wasser noch atmen können; ihre Nachkommen füllen später den wieder wohl belüfteten Tümpel.



Stephen Jay Gould (1941–2002)

Nach Gould hat die Selektion die große interindividuelle Varianz der Kiemenfunktion belohnt. Aber: Viele Individuen sterben auch hier, und die Überlebenden verkörpern nur einen schmalen Ausschnitt der Varianz; vererben sie nur den an ihre Nachkommen, dann hat die Selektion genau das Merkmal zerstört, das sie angeblich belohnt hat.

Vor allem aber: Art-Selektion spielt sich stets, wie schon ihr Erfinder Hugo de Vries 1905 betonte, zwischen Arten ein und derselben systematischen Einheit ab. Deswegen hat auch Gould zwei nahe verwandte Fischarten und nicht etwa Fisch gegen Wurm oder Krebs konkurrieren lassen. Er verschleiert mit vielen Worten, dass es in diesem Fall eben doch nur die relativ wenigen unterschiedlichen Gene sind, an denen die Selektion ansetzt, und nicht grundsätzlich verschiedene Systeme.

Und schließlich: Oft entscheidet die unbelebte Umwelt über die weitere Evolution einer taxonomischen Einheit. Man mag auch das Selektion nennen und muss dann jede Einheit für sich betrachten. Nach Darwins Konzept beruht die natürliche Selektion jedoch auf einer Konkurrenz um gemeinsam genutzte Ressourcen, bei dem ein Konkurrent seinen relativen Vorteil auf Kosten eines anderen erreicht. Der gemeinsame Tümpel in Goulds Beispiel erweckt zwar den Anschein von Konkurrenz, doch jede Art kämpft allein um ihr Dasein. Sauerstoffgehalt hat eher die Eigenschaften einer Temperatur als einer Nahrung: Er kann zwar lebensgefährlich niedrig sein, aber man kann ihn den anderen Individuen nicht wegfressen. Die angeblich konkurrierenden Arten aus Goulds Beispiel könnten ebenso gut in Tümpeln auf verschiedenen Kontinenten leben.

Sein zweites Beispiel, in der die Populationsstruktur das emergente Merkmal ist, kann ebenfalls nicht überzeugen. Einigen brutpflegenden Meeresschnecken erlaubt angeblich die Abgrenzung örtlich isolierter Populationen eine höhere Artbildungsrate als den nicht-brutpflegenden Arten mit planktontischen Larven. Aber Brutpflege ist ein Merkmal des Individuums. Wieder ist von Konkurrenz keine Rede; es geht nur um die Anzahl registrierbarer Zweig-Arten wie in einer Reproduktions-Olympiade.

Eine beherzigenswerte Erweiterung der Evolutionstheorie habe ich in dem Buch nicht gefunden.

Immerhin: Ein unbezweifeltes Verdienst Goulds ist seine strikte Unterscheidung zwischen

- selektionsverursachter Anpassung (Adaptation),
- epiphänomenaler Passung (Zweckentfremdung, Exaptation), das heißt, dass ein bereits auf einen bestimmten Zweck adaptiertes Merkmal einem neuen Zweck dienstbar gemacht wird, und
- zufälliger, Bauplan-inhärenter Eignung. Typisches Beispiel sind die sekundären Pflanzenstoffe: Abfallprodukte des Stoffwechsels, mit denen die Pflanze zunächst nichts anfangen kann, die ihr aber nützen, weil sie für Fressfeinde giftig sind. Gould nennt sie „*spandrel*" („Spandrille", Bogenzwickel) nach einer Gewölbefläche im Markus-Dom in Venedig, die angeblich bautechnisch notwen-

dig, aber obendrein zum Ausmalen mit einem ganz bestimmten Bild-Typ geeignet ist. Allerdings heißt solche Gewölbefläche architektonisch Hänge- oder Strebebogen (*pendentive*); und es gibt dazu eine bautechnische Alternative, den Stützbogen (*squinch*). Der aber lässt sich nicht so schön ausmalen. Also ist das *pendentive* eine Anpassung, aber Gould nennt sie *spandrel* und meint damit eine Nicht-Anpassung. Alles klar?

Wolfgang Wickler

Der Rezensent ist kommissarischer Leiter des Max-Planck-Instituts für Verhaltensphysiologie in Seewiesen.



ARCHÄOLOGIE

Sabine Rieckhoff und Jörg Biel
Die Kelten in Deutschland
Konrad Theiss, Stuttgart 2001. 542 Seiten, € 64,–

Als die Ausgräber im Juni 1996 am Fuße des Glauberges in Hessen die lebensgroße Sandsteinstatue eines Keltenfürsten zutage förderten (Spektrum der Wissenschaft 05/2002, S. 96), hatte die Keltenforschung ihre größte Sensation, seit 1978/79 das ungestörte und reich mit Beigaben versehene „Fürstengrab" von Hochdorf in Württemberg aufgedeckt worden war. Spätestens mit der damals folgenden Wanderausstellung nahm das allgemeine Interesse an „den Kelten" einen rasanten und bis heute ungebrochenen Aufschwung. Die Zahl der Museumsbesucher und der Veröffentlichungen steigt; die populäre Literatur treibt die kuriosesten Blüten. Material über die Hinterlassenschaften und Gebräuche ist reichlich vorhanden; in dem vorliegenden Werk wird es aus archäologischer Sicht überregional zusammengefasst.

Das Buch besteht aus zwei ungefähr gleich großen Teilen. Im ersten fasst Sabine Rieckhoff, Professorin für Ur- und Frühgeschichte an der Universität Leipzig und zuvor lange in Süddeutschland in der Denkmalpflege tätig, auf mehr als 260 Seiten den aktuellen Forschungsstand zur Geschichte und Kultur der Kelten zusammen. Die Kelten, so die Autorin, waren mangels gemeinsamer Identität und politischen Bewusstseins zu keiner Zeit ein einheitliches Volk in einem einheitlichen Staatsgebilde, sondern ein Sammelsurium vielfältiger ethnischer Gruppen, die einerseits viele Gemeinsamkeiten über große Entfernungen, andererseits tief gehende Unterschiede auch unter engen Nachbarn aufwiesen. Mit dieser These geht Rieckhoff auf eine *tour d'horizon* durch sämtliche Bereiche keltischen Lebens zwischen dem 8. und 1. Jahrhundert v. Chr.: Wohnen und Arbeiten, Wirtschaft und Gesellschaft, Religion und Kunst, Tod und Nachleben.

Der zweite Teil des Buches führt alle wesentlichen heute noch in Deutschland sichtbaren Geländedenkmäler aus dieser Zeit auf. Koordiniert von Jörg Biel, dem Leiter der Archäologischen Denkmalpflege des Landesdenkmalamts Baden-Württemberg und seinerzeit verantwortlich bei der Ausgrabung des Fürstengrabs von Hochdorf, stellen hier fast fünfzig erfahrene Forscher „ihre" Geländedenkmäler von etwa 120 Orten in sechs Bundesländern vor. Die Zusammenstellung umfasst in Text und Bild alle wichtigen Siedlungen, Gräber(-felder), Werk- und Kultplätze sowie Deponierungen in ihrer ganzen Variationsbreite. Die Einträge sind knapp, aber präzise und unterrichten über Forschungsgeschichte, Befund, Funde, Funktion und zeitliche Einordnung der Anlagen. Die Auflistung erfolgt alphabetisch nach Ortsnamen, sodass die Lektüre in der Reihenfolge des Textes einem wilden Ritt durch die Südhälfte der Republik gleichkommt. Eine Übersichtskarte der aufgenommenen Orte hätte die Orientierung wesentlich erleichtert.

Weibliche Tragefigur der Totenliege aus dem „Fürstengrab" von Hochdorf (siehe auch den Beitrag auf Seite 92)

Viele Fragen sind noch offen und werden in der Forschung sehr kontrovers diskutiert. Das macht sich dadurch bemerkbar, dass einzelne Autoren des topografischen Teils des Öfteren andere Meinungen vertreten als Sabine Rieckhoff in ihrer Synthese, vor allem was die soziale Organisation der Kelten und ihre zivilisatorischen Leistungen angeht.

Das Kerngebiet der keltischen Kultur erstreckte sich mindestens vom Pariser Becken bis zu den Karpaten. Durch die geografische Beschränkung auf Deutschland bleiben also weite Teile außen vor; im Überblick werden darum immer wieder auch die angrenzenden Siedlungsräume, vor allem Frankreich und die Nordschweiz, aber auch der nördliche Mittelmeerraum als Herkunftsgebiet vieler Importgüter in die Darstellung einbezogen.

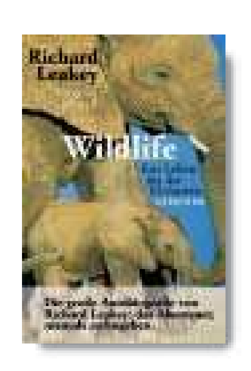
Ein umfassender, gut lesbarer und gleichzeitig fundierter Überblick auf aktuellem Stand.

Martin Wieland

Der Rezensent hat Archäologie, Ur- und Frühgeschichte studiert und ist Mitarbeiter in einem Forschungsprojekt am Archäologischen Institut der Universität zu Köln.



Der Bronzekessel aus dem „Fürstengrab" war mit drei dieser Löwen versehen.



ARTENSCHUTZ

Richard Leakey und Virginia Morell

Wildlife

Ein Leben für die Elefanten

Aus dem Englischen von Sebastian Vogel.
S. Fischer, Frankfurt am Main 2002. 416 Seiten, € 24,90

Organisierte Banden von Wilderern treiben in Kenias Nationalparks ihr Unwesen. Sie schlachten mit automatischen Waffen ganze Elefantensippen wegen ihrer wertvollen Stoßzähne ab, terrorisieren die Landbevölkerung und überfallen Touristen. Korrupte Beamte der Naturschutzbehörde (*Wildlife and Conservation Management Department*, WCMD) machen mit den Wilderern gemeinsame Sache, und etliche Wildhüter schießen gar selbst Elefanten. Dabei sind diese das Aushängeschild für Kenias Tourismusbranche und akut bedroht: Von dem in zehn Jahren von 85000 auf 22000 Tiere geschrumpften Bestand werden durchschnittlich drei pro Tag gewildert.



Richard Leakey untersucht zwei menschliche Schädel in Nariokotome am Turkanasee (Nordkenia).

Das ist die Situation, in der Kenias Staatspräsident Daniel arap Moi im April 1989 Richard Leakey zum Chef des WCMD ernennt. Zu jener Zeit ist Leakey bereits ein international bekannter Mann. Mit erst 23 Jahren ist er ohne nominelle Ausbildung Direktor des Nationalmuseums geworden und hat es über zwanzig Jahre lang zu einer ersten Adresse in Afrika ausgebaut. Vortragsreisen, eine Fernsehserie sowie Bestseller-Bücher (Spektrum der Wissenschaft 08/1995, S. 115 und 08/1998, S. 112) haben dem Urmenschen-Forscher, Naturkundler und patriotischen Kenianer zu exzellenten Beziehungen und Ansehen verholfen.

Leakey sagt Wilderei und Korruption den Kampf an, und sein Leben wird zu einem Husarenritt durch die Konfliktfelder afrikanischer Naturschutzpolitik und in die Hinterhalte von Machtinteressen. Er setzt durch, dass Präsident Moi für den Minister für Tourismus und Naturschutz „eine neue Arbeit findet“. Er erhält grünes Licht, um 1600 korrupte oder überflüssige Mitarbeiter (von insgesamt über 4500) des WCMD loszuwerden und selbst Personal einzustellen. Im Ausland wirbt er innerhalb kurzer Zeit mehrere hundert Millionen Dollar ein – überwiegend bei der Weltbank – und baut eine neue schlagkräftige Naturschutzbehörde auf, den halbstaatlichen *Kenyan Wildlife Service* (KWS). Das Parlament genehmigt Nato-Sturmgewehre für die Wildhüter, um die ebenfalls mit Kriegswaffen ausgerüsteten Banden zu bekämpfen. Mit hohem Blutzoll auf beiden Seiten – Wilderer ergeben sich selten – gehen Bandenterror und Wilderei drastisch zurück, die Touristen sind wieder sicher.

Mit spektakulären Aktionen bringt Leakey Wilderei und Elfenbeinhandel in die Medien und zusammen mit anderen Staaten den Afrikanischen Elefanten in den Anhang I des Washingtoner Artenschutzabkommens CITES. Damit ist der Handel mit Elfenbein weitgehend verboten. Als er auch von Abnehmerländern wie den USA und den EU-Staaten eingestellt und durch Medienkampagnen geächtet wird, bricht der Preis des einst begehrten Stoßzahnmaterials ein.

Leakey geht mit ungestümer Energie zu Werke und scheint durch nichts aufzuhalten zu sein. So stößt er einige Naturschutzverbände vor den Kopf, weil er deren „untaugliche“ Projekte auf Eis legt. Menschenrechtsorganisationen kreiden ihm an, dass er Nomaden aussiedelt, die sich illegal ganzjährig in Nationalparks niedergelassen hatten, und auf Wilderer schießen lässt.

All das erzählt Leakey freimütig, in direkten, klaren Worten, knappen Bildern und mit britischem Gleichmut. Er äußert seine eigenen Gefühle und achtet sehr genau auf die Befindlichkeiten seiner Gesprächspartner. Dabei ist seine Sprache nicht sehr originell; seine Koautorin, die amerikanische Reise-Journalistin Virginia Morell, hat seine Aufzeichnungen offenbar nicht wesentlich aufgewertet. Leakey fasziniert mit seiner Authentizität: Er „trägt sein Herz auf der Zunge“, er kann hart austeilen, aber auch beobachtend neben sich stehen und Selbstkritik üben.

Seine groß angelegten Naturschutz-Projekte sehen zunächst die Sicherung der Lebensräume in den Nationalparks sowie einen naturverträglich gesteuerten Tourismus vor. Zugleich will er den umliegenden Kommunen Gelder für die Entwicklung ihrer Infrastruktur zuschießen, wenn sie selbst die Instandhaltung von Straßen oder eigene Naturschutzprojekte in die Hand nehmen.

Doch hier scheitert er. Vermutlich tragen nicht nur Gezänk mit Stämmen und Gemeinden sowie Neid und Habgier der politischen Elite dazu bei, sondern auch sein kompromisslos harter Kurs. Im März 1994 tritt Leakey zurück, nach schweren öffentlichen Angriffen von Regierungsmitgliedern und Zeitungskampagnen. Seine Gegner werfen ihm nun selbst Korruption, Rassismus und Missmanagement vor. Eine Untersuchungskommission der Regierung kann ihm jedoch nichts nachweisen. 1998 wird Leakey quasi rehabilitiert und erneut Chef des KWS, später sogar, bis zum März 2001, Leiter der obersten Verwaltungsbehörde.

Über weite Strecken verfestigt sich der Eindruck, dass Leakey mit dieser Rückschau auf die schweren Vorwürfe zu seiner Amtsführung antworten will. Er begründet sein hartes Vorgehen oder gibt sich wehrlos gegenüber Gerüchten aus dem Dunstkreis der politischen Macht. Gern möchte man seiner Sicht der Dinge glauben, doch gibt es einige Ungereimtheiten. So spricht er auf Seite 244 von 1500 bewaffneten Mitarbeitern, an späterer Stelle erwähnt er nur 500 gegenüber seinem Vorgesetzten.

Und da Leakey auf den ersten rund 120 Seiten zwischen der aktuellen Situation und historischen Ereignissen springt, leiert auch der Spannungsbogen zu einem der zentralen Ereignisse aus: der Verbrennung von rund 2000 konfiszierten Stoßzähnen im Wert von 3 Millionen Dollar am 18. Juli 1989 als Signal Kenias gegen den Elfenbeinhandel.

Wilderei und Elfenbeinhandel sind auch im Jahr 2002 aktuell: Derzeit beantragen fünf südafrikanische Staaten bei CITES, den Elfenbeinhandel wieder zuzulassen; wenn dieses Heft erscheint, hat die 12. Konferenz zum Washingtoner Artenschutzabkommen in Santiago de Chile im November 2002 darüber entschieden.

Martin Bopp

Der Rezensent ist Tierökologe und freier Journalist in Bielefeld.

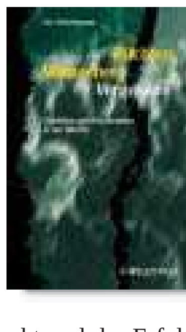
ZEITGESCHICHTE

Ute Deichmann

Flüchten, Mitmachen, Vergessen

Chemiker und Biochemiker in der NS-Zeit

Wiley-VCH, Weinheim 2001. 608 Seiten, € 34,90



Wissenschaftler unter Hitler – dabei denkt man zunächst an die Physik. Dabei stellten die Chemiker auch damals die weitaus größte Berufsgruppe unter allen Naturwissenschaftlern und bildeten – nach den Ärzten – die zweitgrößte Gruppe unter den aus Deutschland emigrierten. Auf Grund ihrer wirtschaftlich-industriellen Bedeutung stand die Chemie zudem im Schnittpunkt der Interessen von Staat und Wirtschaft. Gleichwohl ist das Thema Chemie im nationalsozialistischen Staat – von Themen wie IG Farben, Synthesekautschuk und der (meist überbewerteten) „Deutschen Chemie" abgesehen – bisher von der Forschung vernachlässigt worden.

Die Wissenschaftshistorikerin Ute Deichmann, die sich durch Arbeiten zur Biologie der NS-Zeit bereits ausgewiesen hat, nimmt in ihrer hier vorliegenden Habilitationsschrift nun die Gesamtheit der habilitierten Chemiker oder Biochemiker aller deutschen und österreichischen Hochschulen sowie der promovierten Wissenschaftler an Kaiser-Wilhelm-Instituten unter die Lupe. Insgesamt sind an die 800 Personen erfasst.

Im ersten Teil des Buches geht es um Vertreibung, Entlassung und Emigration jüdischer und nichtjüdischer Chemiker, um die Reaktionen ihrer akademischen Umwelt und um die Auswirkung der Vertreibung auf die Forschung in Deutschland sowie in den Aufnahmeländern. Im zweiten Teil werden Parteimitgliedschaft und Karrieremuster untersucht und der Erfolg opportunistischen Verhaltens anhand der Forschungsförderung durch Forschungsgemeinschaft, Reichsforschungsrat oder die Industrie überprüft. Der dritte Teil präsentiert am Beispiel der Biochemie institutionelle Entwicklungen und Forschungserfolge auf den einzelnen Arbeitsgebieten vor dem Hintergrund der internationalen Entwicklung. Im vierten Teil schließlich geht es um Kontinuitäten und Diskontinuitäten über die NS-Zeit hinaus.

Auf diese Weise entsteht eine vielfältige Innenansicht einer Wissenschaft. Auf viele Fragen gibt es neue und gut belegte Antworten. Der industrielle Sektor ist nicht vertreten, wäre freilich mit den von Ute Deichmann verwendeten Methoden nicht zu erfassen gewesen. Die inhaltliche Entwicklung des Faches ist lediglich für die Biochemie im Detail dargestellt; von der physikalischen Chemie beschreibt die Autorin im Wesentlichen nur die makromolekulare Chemie, und von analytischer und anorganischer Chemie erfährt man wenig.

Beeindruckend und in diesem Ausmaß bisher nicht bekannt war, dass 26 Prozent aller Chemiker in akademischen Positionen entlassen wurden und/oder emigrierten – in der gleichen Größenordnung wie in der Physik und von ähnlich weit reichenden Auswirkungen auf die Forschungslandschaft! Unbekannt war auch der hohe Anteil von Chemikern jüdischer Abstammung unter den Entlassenen. Auf eine junge Wissenschaftslandschaft wie die Israels nahmen die Emigrierten maßgeblichen Einfluss; hingegen wurden wichtige Arbeitsgebiete insbesondere der Biochemie und der physikalischen Chemie in Deutschland durch das Verschwinden der führenden Köpfe nachhaltig geschwächt.

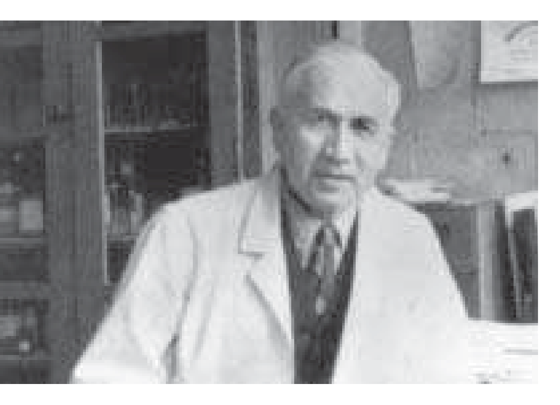
Gleichwohl trat ein allgemeiner Niedergang der chemischen Forschung in Deutschland nicht ein. Vielmehr stieg die Förderung durch Forschungsgemeinschaft und staatliche Stellen an, wovon kriegsbedingt vor allem anwendungsorientierte Gebiete profitierten; aber auch die Grundlagenforschung wurde weiter unterstützt, insbesondere im Gebiet der Naturstoffchemie und des Stoffwechsels. Interessant ist dabei, dass die öffentlichen Mittel im Wesentlichen nach Kriterien der wissenschaftlichen Qualität und keineswegs vorrangig nach Parteizugehörigkeit vergeben wurden.

Neben diesen auch quantitativ gut untermauerten Befunden gelingt es der Autorin, mit Hilfe von Quellenzitaten und Fallstudien die Motive und Mentalitäten der Akteure innerhalb der vielfältigen Kollaborationsverhältnisse zwischen Wissenschaft und Politik herauszuarbeiten – am subtilsten vielleicht bei der Behandlung der unmittelbaren Nachkriegszeit. Als Grundlage dienten Briefwechsel zwischen Emigranten und in Deutschland gebliebenen Chemikern – auch wenn es unter Ersteren nur wenige gab, die kurz nach Kriegsende schon wieder zu solcher Korrespondenz bereit waren, wie etwa den Biochemiker Otto Meyerhof (Bild links unten). Auf diese Weise entstehen nicht nur faktische, sondern auch psychologische Innenansichten von Chemie und Biochemie.

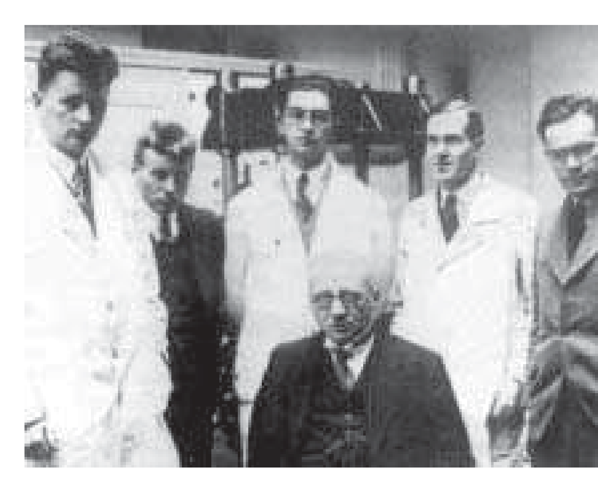
Ute Deichmanns Buch legt in überzeugender Weise Binnenstrukturen in der deutschen Wissenschaft des Nationalsozialismus offen, stellt diese in ihren historischen Kontext und zeigt Kontinuitäten über das Jahr 1945 hinaus auf. Damit wird ein wichtiges Teilgebiet der Wissenschaftsgeschichte des 20. Jahrhunderts erstmals aufgearbeitet und eine seit langem beklagte Forschungslücke geschlossen.

Christoph Meinel

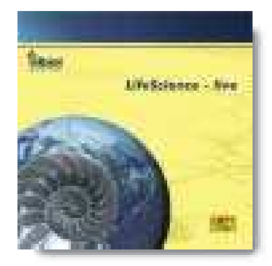
Der Rezensent ist Professor für Wissenschaftsgeschichte an der Universität Regensburg.



Otto Meyerhof (1884–1951, Nobelpreis 1923) war Leiter des Instituts für Physiologie am Kaiser-Wilhelm-Institut für Medizinische Forschung in Heidelberg, bis er 1938 zur Emigration gezwungen wurde.



Fritz Haber (1868–1934, Nobelpreis 1918), Chemiker von Weltrang, Jude, von deutschnationaler Gesinnung und Organisator des Giftgaseinsatzes im Ersten Weltkrieg, reichte 1933 auf die Anweisung hin, seine „nicht-arischen" Mitarbeiter zu entlassen, seinen Abschied ein. Das Bild zeigt ihn im Kreise seiner Assistenten um 1930.



BIOLOGIE

Verband deutscher Biologen und biowissenschaftlicher Fachgesellschaften (Hg.)

LifeScience – live

CD-Rom zu den Münchner Wissenschaftstagen

capsid, Düsseldorf 2002. € 5,–; zu beziehen auch über www.vdbiol.com

Die CD-Rom enthält „Beiträge von Experten, die im Jahr der Lebenswissenschaften 2001 bei den Münchner Wissenschaftstagen ‚LifeScience-live‘ und bei der Göttinger Veranstaltung ‚Gehirn und Geist‘ der Neurowissenschaftlichen Gesellschaft geboten wurden“. Unter diesen Experten findet sich diesmal auch ein (nicht namentlich genannter) Vertreter des Bayerischen Landeskriminalamtes, der sich über die DNA-Analyse in der Kriminaltechnik äußert.

Neben aktuellen Reizthemen wie Stammzellenforschung, Genpatente, Pränatal- und Fortpflanzungsmedizin, Prionenforschung und Lebensmittelüberwachung sind auch wissenschaftlich ergiebigere Themen wie die Echoortung von Fledermäusen, höhere Funktionen des Gehirns und Ökosystemforschung anhand aktueller Beispiele vertreten.

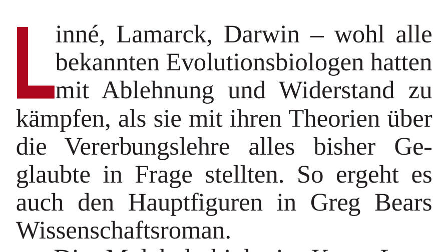
Die CD wendet sich neben der interessierten Öffentlichkeit vor allem an die allgemeinbildenden Schulen. In der Tat bieten die meisten Artikel eine Fülle an Information, setzen aber etliches an Grundverständnis voraus. Teilnehmer eines Biologie-Kurses in der gymnasialen Oberstufe müssten einzelne Themen mit entsprechendem Vorwissen eigenständig bearbeiten können, werden allerdings das Glossar zu Rate ziehen müssen. Diese Begriffssammlung ist sehr umfangreich und trotz einiger Fehler (so ist der Begriff „Reifung“ im Artikel über Gehirnentwicklung falsch erklärt) insgesamt sehr gut.

Für Lehrer bietet diese CD-Rom ebenfalls viele Texte zum aktuellen Stand der Wissenschaft, die für den Unterricht verwendbar sind, zumal sie in den Lehrplan der gymnasialen Oberstufe passen. Manche Artikel sind so knapp, dass sie einige Fragen offen lassen; hier wären weiterführende Literaturhinweise sinnvoll gewesen. Manche Abbildungen sind auch bei Vergrößerung so undeutlich, dass man sie hätte weglassen können.

Trotz dieser Kritikpunkte: Die Informationsfülle und der niedrige Preis machen das Werk empfehlenswert.

Brigitte Fellmann

Die Rezensentin ist Biologielehrerin am Werner-Heisenberg-Gymnasium in Bad Dürkheim.



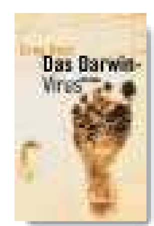


Titelseite des Kapitels „Neurobiologie“ (oben); eine von zahlreichen Seiten aus dem Kapitel „Agrarwirtschaft“ (unten)

THRILLER

Greg Bear

Das Darwin-Virus



Aus dem Englischen von Sebastian Vogel.
Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2001. 564 Seiten, € 24,95

Linné, Lamarck, Darwin – wohl alle bekannten Evolutionsbiologen hatten mit Ablehnung und Widerstand zu kämpfen, als sie mit ihren Theorien über die Vererbungslehre alles bisher Geglaubte in Frage stellten. So ergeht es auch den Hauptfiguren in Greg Bears Wissenschaftsroman.

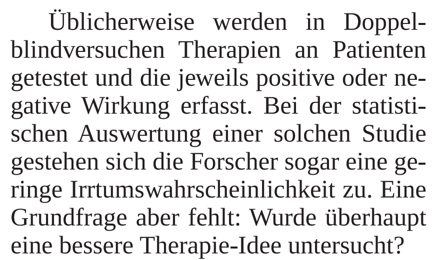
Die Molekularbiologin Kaye Lang und der Archäologe Mitch Rafelson machen unglaubliche Entdeckungen, aus denen sie nur den Schluss ziehen können, dass die Evolutionsgeschichte des Menschen umgestoßen und völlig neu geschrieben werden muss. Nicht durch zufällige Mutationen, wie bisher angenommen, sondern durch zielgerichtete Veränderungen im Erbgut habe sich der Mensch weiterentwickelt und dadurch besser an seine Umgebung angepasst.

Zu Beginn des Romans stehen drei scheinbar unabhängige Vorfälle: Unweit der georgischen Hauptstadt Tiflis wird ein Massengrab entdeckt, in dem sich etwa sechzig Frauen, Männer und Kinder finden. Alle weiblichen Opfer waren schwanger, als sie starben. Es stellt sich heraus, dass die Ermordung der Menschen nicht in grauer Vorzeit stattfand, sondern lediglich fünf Jahre zurückliegt. Die georgischen Behörden tun alles, um diese Entdeckung zu vertuschen.

Zur selben Zeit werden in den österreichischen Alpen in einer Höhle drei Mumien gefunden: ein Neandertaler-Paar mit einem Neugeborenen an seiner Seite. Doch das Kind weist überraschenderweise Merkmale eines modernen *Homo sapiens sapiens* auf.

Unterdessen verbreitet sich weltweit eine Viruskrankheit, die so genannte Herodes-Grippe, von der nur schwangere Frauen betroffen sind. Der Krankheitserreger verursacht Fehlgeburten, wobei die abgestoßenen Feten sehr starke Fehlbildungen aufweisen. Außerdem wird immer wieder berichtet, dass diese Frauen erneut schwanger werden, auch ohne sexuellen Kontakt.

Besteht irgendein Zusammenhang zwischen diesen Ereignissen? Zunächst scheint dies nicht der Fall zu sein. Doch Kaye Lang, Spezialistin für Retroviren, sieht eine Verbindung: Sie entdeckt virale Elemente namens SHEVA, die seit Millionen von Jahren ins menschliche Erbgut integriert sind, offenbar auf unbekannte Weise aktiviert werden und vermutlich für die geheimnisvolle Grippe verantwortlich sind. SHEVA kann sowohl bei den urzeitlichen Neandertaler-Leichen und ihrem Säugling als auch bei den in Georgien gefundenen Toten nachgewiesen werden. Lang glaubt, dass dieses Retrovirus nicht nur für den Ausbruch der neuartigen Influenza verantwortlich ist, sondern vielmehr eine Art Evolution durch eine plötzliche Weiterentwicklung des Menschen bewirkt. Mitch Rafelson, der die Höhlenleichen gefunden hat, ist ▶



ebenfalls ihrer Ansicht. Dagegen sieht Christopher Dicken, Virologe von den National Centers for Infectious Diseases in Atlanta, durch die Epidemie den Fortbestand der Menschheit bedroht. Zur Bekämpfung des Virus leitet er drastische Maßnahmen wie Zwangsabtreibungen bei Schwangeren, die SHEVA tragen, ein.

Im Rennen gegen die Zeit versuchen beide Parteien, das Rätsel zu lösen, herauszufinden, ob SHEVA nur ein gefährlicher und mysteriöser Krankheitserreger oder aber ein Motor für die Entwicklung einer neuen menschlichen Art und damit für die sprunghafte Evolution ist.

„Das Darwin-Virus" ist ein gut recherchierter Wissenschaftsroman um ein faszinierendes, fesselndes Thema, der zeigt, dass wissenschaftliche Thesen häufig keine unumstößlichen Gesetze darstellen. Der Leser erhält Einblick in die alltägliche Welt der Biowissenschaftler und deren Probleme, neue und unmöglich erscheinende Entdeckungen in der Öffentlichkeit glaubhaft zu vertreten.

Gleichzeitig übt der Autor unterschwellig Kritik an der heutigen Welt voller Schnelligkeit und Wachstum, in der der Mensch oft überfordert ist. Er zeigt auf, dass der Lauf der Zeit, selbst wenn jedes noch so kleine Detail des Lebens erforscht zu sein scheint, durch den Menschen nicht aufgehalten werden kann.

Doch trotz der spannenden Idee und des durchaus gelungenen fesselnden Anfangs krankt der Roman an einigen Längen im Mittelteil. Auch die eingeflochtene Liebesgeschichte zwischen den Protagonisten ist meiner Meinung nach flach – und außerdem überflüssig. Leider entwickelt sich aus dem Wissenschaftsthriller immer mehr ein Science-Fiction-Roman, dessen Unwirklichkeit in der Auflösung des Rätsels und dem Schluss gipfelt. Etwas weniger fiktional und irreal hätte sicher besser gewirkt.

Susanne Dorn

Die Rezensentin ist Diplom-Humanbiologin in Greifswald.

MEDIZIN

Hans-Peter Beck-Bornholdt, Hans-Hermann Dubben

Der Schein der Weisen

Irrtümer und Fehlurteile im täglichen Denken

Hoffmann und Campe, Hamburg 2002. 207 Seiten, € 18,95



Mit achtzigprozentiger Wahrscheinlichkeit wurde O. J. Simpsons Frau von ihrem Mann ermordet, und der Beschuss der chinesischen Botschaft im Kosovo-Krieg beruhte höchstwahrscheinlich, nämlich zu 85 Prozent, auf Vorsatz. Reine Vermutungen, geschätzt nach Pi mal Daumen? Nein, solche Wahrscheinlichkeiten lassen sich rechnerisch herleiten. Da nützt es nichts, dass Simpsons Anwalt vor Gericht zutreffend anführt, dass nur einer von tausend Männern, die ihre

Wie viele Ideen für neue Therapien sind gut? Vielleicht zwei Prozent …

Frau regelmäßig schlagen, sie auch ermordet. Entscheidend ist die Frage, bei wie vielen ermordeten Frauen, die regelmäßig von ihrem Mann geschlagen wurden, der Mann auch der Täter war. Und im Falle der chinesischen Botschaft bleibt nur wenig Raum für vage Mutmaßungen, wenn man alle Faktoren veranschlagt – wie die Zahl aller Häuser in Belgrad, die Zahl der für einen Beschuss in Frage kommenden Ziele, die Zahl der Geschosse sowie die Vorab-Einschätzung des Vermutenden über die Bereitschaft der Amerikaner, die Botschaft zu beschießen.

Mit zahlreichen Fallbeispielen beschreiben die Autoren, beide Physiker und Professoren am Fachbereich Medizin der Universität Hamburg, verblüffende Folgerungen aus der Wahrscheinlichkeitslogik. Die vertraute Wenn-dann-Logik ist auf viele Sachverhalte nicht anwendbar. Erst dadurch, dass ein „wahrscheinlich" in die Rechnung einbezogen wird, kann man alle Faktoren ins Kalkül ziehen – und bekommt daraufhin völlig andere Ergebnisse.

Welche Irrtümer und Fehlschlüsse entstehen können, wenn nur einige dieser Zutaten außer Acht bleiben, zeigen die Autoren für die verschiedensten Lebensbereiche. Stück für Stück widerlegen sie unsere für sicher geglaubten Meinungen. In witzigen und spannenden Geschichten führen sie uns von Wettervorhersagen und Bilanzmanipulationen über Börsenbewegungen bis hin zu ihrem Hauptanliegen: der „Lebenslüge der medizinischen Forschung". Es geht um Fehlschlüsse, die durch falsche Interpretationen medizinischer Tests und Studien entstehen.

Üblicherweise werden in Doppelblindversuchen Therapien an Patienten getestet und die jeweils positive oder negative Wirkung erfasst. Bei der statistischen Auswertung einer solchen Studie gestehen sich die Forscher sogar eine geringe Irrtumswahrscheinlichkeit zu. Eine Grundfrage aber fehlt: Wurde überhaupt eine bessere Therapie-Idee untersucht?

Das Buch verdeutlicht das mit einem Angelbeispiel: In einem Teich gibt es zwei Arten Fische, die begehrten Leckerellen und die ungenießbaren Ekelitzen. Um die Wirksamkeit eines Angelköders für Leckerellen zu testen, hängt man ihn ins Wasser und zählt, wie viele Fische jeder Art anbeißen. Weiß man dann, ob und wie sehr die Leckerellen den Köder mögen? Beileibe nicht. Es kommt darauf an, wie viele Fische der einen und der anderen Art überhaupt im Teich sind. Möglicherweise schwimmt dort gerade keine einzige Leckerelle, also beißt auch keine an; man angelte dann nur Ekelitzen, die den – vielleicht für Leckerellen hervorragenden – Köder nur in der Not fressen. Welchen Wert hat also die reine Zählmethode, um eine Aussage über die Qualität des Köders zu bekommen?

Auf medizinische Studien übertragen: Wie aussagefähig ist ein Studienergebnis, wenn Therapie-Köder ausgelegt werden, ohne zu wissen, wie viele Ideen-Fische überhaupt im Forschungsmilieu schwimmen?

Eine weitere Schwierigkeit kommt hinzu: Die Wahrscheinlichkeit von guten Ideen für neue Therapien ist nicht bekannt. Man könnte sie höchstens subjektiv schätzen (Vorschlag der Autoren: zwei Prozent). Weil sie also fast nicht quantifizierbar ist, darf sie, so argumentieren die Statistiker, bei der Bewertung wissenschaftlicher Ergebnisse auch nicht veranschlagt werden. Denn Subjektivität soll in der Forschung möglichst ausgeschlossen bleiben. Folglich wird der Faktor Ideen-Wahrscheinlichkeit ganz aus der Fragestellung und der statistischen Auswertung ausgeklammert. Das Problem existiert also offiziell gar nicht, obwohl es den Fachleuten bekannt ist.

Das Buch bietet vergnüglichen Lesestoff als Verpackung für wissenschaftskritischen Zündstoff: Die Autoren weisen nach, dass randomisierte Studien überflüssig oder sogar schädlich sind. Sie zeigen, dass viele der „wissenschaftlich nachgewiesen besseren Therapien" nicht besser und vielfach sogar schlechter sind als das, was sie verbessern sollen.

Eva Kahlmann

Die Rezensentin ist Redaktionsassistentin bei Spektrum der Wissenschaft.

Internet für Hörer aller Fakultäten

Alles, was man wissen muss: Ein texanischer Universitätsrechner gewährt Zutritt zu den heiligen Hallen der Online-Bildung.

Von Thilo Körkel



UNIVERSITY OF TEXAS AT AUSTIN

Multimedial und humanistisch gesinnt: Die Homepage der World Lecture Hall bietet „freie Wissenschaft vom Volk fürs Volk".

Der Online-Boom der 1990er Jahre beförderte auch akademische Bildungsinhalte ins Netz. Das große Projekt einer virtuellen Universität hat sich zwar bislang in finanziellen, technischen und konzeptionellen Unzulänglichkeiten verfangen. Aber die (reale) Universität von Texas in Austin bietet seit 1994 einen Wegweiser zu Online-Vorlesungen aus aller Welt, den sie ständig aktualisiert: den „Welthörsaal" (http://wnt.cc.utexas.edu/~wlh).

In über neunzig natur- und geisteswissenschaftlichen Fächern, von Astronomie über Anthropologie, Geschichte und Religion bis hin zur Zoologie, können Internet-Surfer weit reichende Studien treiben. Ausdauer ist gefragt: So mancher Mausklick fördert nicht viel mehr als Vorlesungspläne zu Tage oder fordert kostenpflichtige Registrierungen. Häufig dienen die Seiten auch nur als Ergänzung zu einer Präsenzvorlesung. Wer trotzdem dranbleibt, den belohnt die Suchmaschine der World Lecture Hall mit faszinierenden Links auf umfassende Text- und Bildersammlungen, abgerundet mit Filmen, Sprachsequenzen und interaktiven Anwendungen.

Eine Online-Einführung in die Chemie bietet zum Beispiel www.scidiv.bcc.ctc.edu/wv/101-online.html. Fachlich anspruchsvoll und dennoch verständlich ist auch http://simons.hec.utah.edu/TheoryPage/index.html: Jack Simons, theoretischer Chemiker aus Utah, leitet die rasant wachsende Bedeutung seines Fachgebiets aus dessen Funktion als Schnittstelle zwischen Chemie, Mathematik, Physik und Computerwissenschaften ab. Bunt und bewegt geht es in der „Chemist's Art Gallery" (www.csc.fi/chem/gallery.phtml) zu, die auch die Links zur Molekül-„Kunst" auf dieser Seite lieferte. Ein reiches Sortiment interaktiver Animationen etwa zur Molekulardynamik stellt einige Ansprüche an die heimische Hardware.

Ähnlich spektakulär und informativ präsentieren sich auch die Astronomen: Ihr schier unerschöpflicher Fundus von Bildern und Filmen macht das „elektronische Universum" auf http://zebu.uoregon.edu ebenso einen Klick wert wie die Geschichte von „Geburt und Tod der Sterne" auf demselben Server (http://zebu.uoregon.edu/~js/ast122).

Schnell gerät der Wissensdurstige auf reizvolle Seitenpfade, denn viele Vorlesungen glänzen mit sorgfältig zusammengestellten Linklisten. Die führen zum Beispiel zu den „Chemischen Briefen" Justus von Liebigs, wie sie im 19. Jahrhundert zunächst als Wissenschaftskolumne in der Augsburger Allgemeinen Zeitung erschienen (www.liebig-museum.de/ch_briefe/homepage.htm). Selbst die Alchemie – neunzig ansprechend präsentierte Megabyte auf www.alchemywebsite.com – verleitet zum Verweilen.



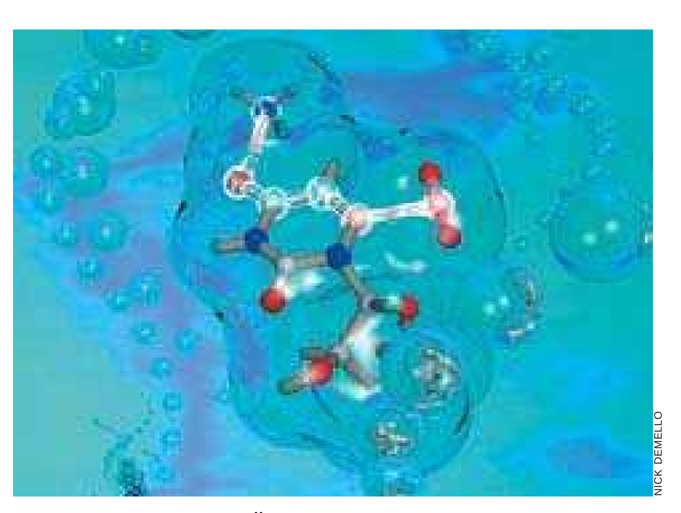
TERESA A. LARSEN

Aids-Viren zum Anfassen: Sie basieren auf komplexen Computergrafiken, die manchem schon als Kunst gelten (www.scripps.edu/pub/goodsell/mgs_art/mgs_art2/larsen2.html).

Historisches ist, weil nicht stets aktualisierungsbedürftig, ohnehin beliebt im Netz. So wartet etwa die Universität Groningen (Niederlande) mit einem voluminösen Hypertext auf, praktisch ein komplettes Lehrbuch der amerikanischen Geschichte mit Texten, Essays und Präsidentenbiografien (http://odur.let.rug.nl/usanew). Noch weiter zurück in die Vergangenheit reicht eine Anthropologen-Website über den Ursprung des Menschen (www.geocities.com/Athens/Acropolis/5579/TA.html). Verspieltere Naturen werden dort zuerst fossile Schädel zuzuordnen versuchen („Name That Skull") oder einem Anthropologiestudenten beim Wurf des Atlatl zusehen. Dieser frühe Wurfspeer machte schon den Mammuts zu schaffen und drang noch vor wenigen hundert Jahren durch die eiserne Rüstung spanischer Konquistadoren.

Selbst Angewandtes bietet die World Lecture Hall. Etwa die „Geschichte der ökonomischen Denkweise" einschließlich eines 22-Minuten-„Interviews" mit Karl Marx auf www.boisestate.edu/econ/lreynol/web/het.htm. Oder Online-Sprachkurse: Wollof und Xhosa, Suaheli und Sanskrit lehrt http://www.word2word.com/coursead.html.

Surfen allein fördert die akademische Karriere allerdings nicht unbedingt. Wer offizielle Online-Zertifikate in Deutschland anstrebt, findet in dem Beitrag „Virtuelle Universität im Selbstversuch" (Spektrum der Wissenschaft 11/2001, S. 109) gute Startpunkte für das Studieren im Netz, angefangen bei – na wo wohl? – www.studieren-im-netz.de.



NICK DEMELLO

Schaumbad-Detail oder Übergangsstadium des Orotidylat? Illustration der Forschungsarbeiten des Biochemikers Kendall N. Houk an der University of California (www.chemgallery.com).

Der Autor ist Diplom-Physiker und Wissenschaftsjournalist in Frankfurt/Main.

Jahresregister 2002

Dieser Index umfasst alle im Jahre 2002 erschienenen Hauptbeiträge (Artikel und Technoskop-Schwerpunkte) sowie deren Autoren. Die Rubriken und Rezensionen sind aus Platzgründen nicht mit aufgenommen, aber im Internet (www.spektrum.de) und im elektronischen Gesamtregister enthalten, das ab Januar 2003 gesondert angeboten wird.

Hauptbeiträge

Autoren der Hauptbeiträge

Kollidierende Sterne



In einem weiteren Punkt müssen Astronomie-Lehrbücher umgeschrieben werden: Entgegen bisheriger Auffassung können Sterne direkt miteinander kollidieren. Die katastrophalen Folgen für die Stoßpartner und die Planeten, die sie womöglich umkreisen, lassen sich im Computer simulieren. Aber die Sternenwracks, die bei solchen kosmischen Verkehrsunfällen entstehen, sind vielleicht in Kugelsternhaufen schon längst beobachtet worden.

Weitere Themen im Januar

Notfallmedizin

Wenn ein Hirnschlag einen Menschen niederstreckt oder ein Unfallopfer blutend auf der Straße liegt, kommt es auf jede Sekunde an. Dann greift eine Notfallkette, die heute die ganze Palette medizinischer Techniken nutzt und durch Forschung ständig verbessert wird.

Menschenevolution: Erkenntnisse im Wandel

Neue vormenschliche Fossilien erschüttern das Weltbild der Anthropologen immer wieder. Lebten Vormenschen bereits vor sechs Millionen Jahren?

Der Schwiegermutter-Effekt

Als Großmutter war sie gern gesehen. Doch als Schwiegermutter der Kindesmutter brachte sie Gefahr für das Kind – zumindest nach Statistiken über eine frühere Bauernbevölkerung.

Die Identität der Quanten

Warum ist die Mikrophysik so unanschaulich? Weil gleichartige Teilchen als völlig identisch behandelt werden!



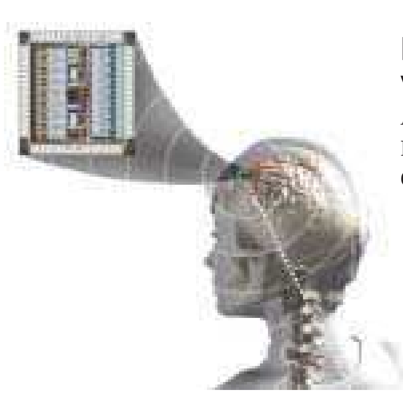
Universalgenie des 10. Jahrhunderts

Der Arzt und Philosoph Avicenna kam wie kein anderer Gelehrter aus dem arabisch-islamischen Raum auch im Abendland zu hohen Ehren. In einer rast- und ruhelosen Epoche verfasste er Werke, die jahrhundertelang an europäischen Hochschulen als Standardlehrbücher benutzt wurden.



Vulkane, die Schlamm statt Lava speien

Weniger spektakulär und gefährlich als die heißen Feuerberge bieten Schlammvulkane mit ihrem sprudelnden Gemisch aus Tonbrei, Wasser und Methan ein eher gespenstisches Schauspiel. Bedeutung erlangen sie durch ihren Beitrag zum Klima und ihre Verbindung mit Öl- und Gas-Lagerstätten.



Roboter steuern von Geistes Hand

Allein kraft der Gedanken einen Rollstuhl, Prothesen oder Roboter zu bewegen – für Gelähmte rückt dieser Traum näher.